Liviu Constantinescu

mesaje ale pămîntului în descifrări actuale

Elocvența cîmpurilor gravific
și geomagnetic
Terra ca sursă de unde
și particule

Liviu Constantinescu

mesaje ale pămîntului în descifrări actuale

Editura științifică
București, 1974

PREFAȚĂ

Are nevoie o lucrare cu destinația şi de dimensiunile celei de față de o prefață? La o primă apreciere, s-ar părea că nu. Chiar dacă n-am merge atît de departe ca Goethe, care, considerînd că „autorii şi publicul sînt despărțiți printr-o prăpastie enormă", admitea inutilitatea absolută a prefețelor „căci cu cît vrei să-ți lămureşti mai bine intenția cu atît dai naştere la mai multe confuzii", caracterul popularizator şi volumul redus al broşurii prezente par a face superflue precizările de poziție şi sublinierile de limitări care se cer, în principiu, exprimate într-o prefață.

Dacă, totuşi, autorul ține să înceapă dialogul cu cititorul în cadrul unei prefețe, este pentru că, socotind că există oarecare şanse ca ea să fie citită, vrea să-i încredințeze un... mesaj propriu, ce nu-şi găseşte locul în expunerea altor mesaje, acelea ale Pămîntului, care constituie obiectul prezentării din paginile următoare. Mesajul conține, pe de-o parte, o informație privind modul în care s-a ajuns la scrierea şi publicarea acestei lucrări şi semnificația pe care autorul i-o atribuie şi, pe de alta, o justificare a titlului ei şi a stilului adoptat pentru prezentarea problemelor tratate.

Scrierea de față a rezultat din interferența preocupărilor Editurii Ştiințifice de a cuprinde în sfera activității sale aspecte cît mai actuale ale cercetărilor şi realizărilor din domeniul ştiințelor Pămîntului cu intenția mai veche a autorului de a face cunoscute unui public larg principalele probleme de interes general şi cu prelungiri pe plan social-cultural ale unei ştiințe, în acelaşi timp vechi şi noi, asupra conținutului şi poziției căreia ideile nu sînt clare nici chiar pentru unii care lucrează în domeniul geoştiințelor: geofizica.

Evident, dată fiind anvergura lor, este greu ca amintitele preocupări ale editurii să-şi poată găsi materializarea completă în cadrul unei singure cărți, de volumul celei de față. Plecînd de la recunoaşterea faptului că ele s-ar putea încorpora, fără distorsionări care să le facă să nu corespundă scopului urmărit, doar în mai multe asemenea scrieri, dedicate diverselor activități desfăşurate pentru cunoaşterea planetei noastre, autorul acestei cărți s-a gîndit la o suită de lucrări de largă informare ştiințifică. În concepția sa, acestea ar urma să prezinte Pămîntul, actualitatea vie a geoştiințelor în imagini cît mai conforme desfăşurărilor reale, dar într-o formă garantîndu-le accesibilitatea. În eventualitatea că interesul publicului şi preocupările editurii s-ar dovedi convergente cu gîndul autorului, lucrarea prezentă ar putea să apară ca „deschizătoare de drum" în dialogul dintre „Noi şi Pămînt". Fără o structurare rigidă, cartea este destinată să satisfacă simultan publicul, editura şi pe autorul care s-a gîndit la ea, prin elementele ei constitutive.

Această poziție potențială a lucrării de față îi impune obligația de a face o prezentare generală a mijloacelor moderne de investigație din domeniul geoştiințelor.

Cum aceste mijloace sînt, în esență, cele geofizice — inițial fizico-matematice, ele au devenit geofizice prin obiectul căruia i-au fost aplicate —, se întîmplă că, ipso facto, rolul broşurii de față corespunde şi intenției amintite mai sus, a autorului. În felul acesta, semnificația lucrării este pusă clar în lumină: ea urmează să servească simultan ca introducere şi ca prezentare de ansamblu pentru aproape întregul domeniu al eventualei serii, destinată să asigure condițiile de cunoaştere a cadrului conceptual şi a mijloacelor moderne de cercetare a structurii şi fenomenologiei Pămîntului, de la interiorul profund cercetat prin intermediul undelor seismice pînă la limitele exterioare ale magnetosferei, sondate geomagnetic. Extinderea şi la alte discipline care studiază Pămîntul a unora dintre considerațiile ce se vor impune în această perspectivă geofizică nu se va putea face prin simplă extrapolare, fără adaptare, dar va fi uşurată de o împrejurare cu totul semnificativă din punctul de vedere care ne interesează acum: problemele de mare actualitate care preocupă pe cercetătorii celor mai variate domenii ale ştiințelor Pămîntului sînt legate, nu numai la scară planetară ci chiar sub aspecte locale, de concepții fundamentate şi elaborate în context geofizic. Nu afirma, recent, un stratigraf-paleontolog că „s-a născut o nouă geologie bazată pe geofizică?"

Titlul broşurii, care poate părea curios la prima vedere, îşi are justificarea în faptul că, spre deosebire de alte mijloace de cercetare utilizate în geoştiințe, metodele geofizice nu se aplică direct obiectului de cercetare propriu-zis, ci unor efecte ale lui, reprezentînd autentice mesaje trimise de acesta, fie de la sine, fie la solicitarea cercetătorului. Asemenea mesaje, cum sînt, de exemplu, deformările cîmpului magnetic terestru legate de unele particularități ale structurii subsolului, undele seismice provenind din focarele cutremurelor de pămînt sau radiațiile emise de formațiuni radioactive ale crustei terestre, au un conținut informațional bogat dar ascuns. El poate fi pus în evidență numai în cadrul unor operațiuni complexe de prelucrare a datelor de observație, care reprezintă forme de detectare a lor, comparabile cu transpunerea în termeni general inteligibili a unui mesaj cifrat. De aici rezultă titlul broşurii de față, care urmăreşte să prezinte cititorului principalele mesaje ale Pămîntului, modul în care se face descifrarea lor în prezent şi informațiile ale căror purtătoare sînt.

Accentul pus chiar în titlu pe actualitatea descifrărilor ce urmează a fi înfățişate pare a fi în contradicție cu un anumit aspect al modului de prezentare adoptat. Într-adevăr, utilizarea, fie ca motto pentru diversele părți ale scrierii, fie ca puncte de sprijin în text, a unor citate, de natură preponderent literară, din opera unor scriitori sau, în general, oameni de artă şi cultură, nu numai de azi ci şi din trecutul nu foarte apropiat nu este de natură să susțină caracterul de actualitate atribuit descifrărilor de mesaje cu care sînt puse în legătură. Lăsînd, însă, la o parte faptul că, fără a fi recente, cele mai multe dintre ele rămîn, totuşi, actuale, aceste citate pot îndeplini, în opinia autorului, importanta dublă misiune de a formula lapidar dar elocvent şi sugestiv idei utile pentru contextul în care apar şi de a contura o imagine vie, chiar dacă ea rămîne

uneori schematică, a generalității interesului prezentat de ideile respective pentru orice om care gîndeşte.

Cititorului, avizat sau neavizat, interesat de conținutul broşurii de față, nu-i poate rămîne indiferentă împrejurarea că variate aspecte ale problemelor abordate în ea au atras şi atenția unor oameni care au fost departe de a fi specialişti. Preocupări legate de structura şi dinamica crustei terestre sau reflexii asupra interiorului Globului au ajuns la expresie literară în scrieri ale lui Lucian Blaga, George Călinescu sau I.L. Caragiale, Walt Whitman s-a entuziasmat pentru tainele ascunse de Pămînt, Blasco Ibañez a avut intuiția a ceea ce azi numim „tectonica plăcilor" şi a rolului oceanelor în viața planetei noastre, Tudor Arghezi şi Marin Sorescu au găsit prilej de meditație sau imagini artistice în unele manifestări geodinamice, Mihail Sadoveanu reuşeşte acoperirea perfectă a adevărului ştiințific cu descrierea literară în prezentarea unui cutremur de pămînt, Tolstoi a gîndit în context literar asupra formulării legii gravitației universale, care a reținut şi atenția lui Voltaire şi a fost ilustrată cu imagini plastice de Longfellow, fapte încadrate astăzi în ceea ce se cheamă izostazie au constituit preocupări pentru Leonardo da Vinci, informații legate de concepții din trecut asupra magnetismului terestru sau de aplicații ale lui au avut ecouri în operele lui Dante şi Rabelais, iar în teatrul lui Shakespeare s-a găsit loc pentru încadrarea literară a modului în care se înțelegea în epoca elisabetană mecanismul de producere al undelor seismice.

Înşirarea aceasta, deja lungă, s-ar putea continua. Continuarea nu este, însă, necesară căci simplele menționări de mai sus, limitate la cîteva cazuri — dintre care unele vor fi reluate în paginile ce urmează —, ilustrează convingător pentru cititorul luminat dar nespecialist interesul cunoaşterii şi înțelegerii principalelor probleme ale anatomiei şi fiziologiei planetei noastre. Ele nu sînt dintre cele mai puțin importante ale contemporaneității căci privesc însuşi cadrul care asigură omenirii viața şi desfăşurarea activității. Ilustrarea este convingătoare atît prin cazul scriitorilor şi umaniştilor din trecut, care, prin prezența în opera lor a ecourilor ştiințifice trezite de probleme ale geoştiințelor, scot în relief semnificația enciclopedismului vremii lor, cît şi prin acela al literaților de azi, a căror permeabilitate la esoterismul acestor ştiințe se înscrie în tendința actuală, tot mai marcată, de integrare nu numai multidisciplinară ci chiar larg culturală a specialităților restrînse.

În cadrul cuprinzător al acestor vederi, autorul scrierii de față îşi exprimă speranța că, prin conținut ca şi prin forma de prezentare, ea va putea reține atenția unui public larg, dornic să nu stea departe de preocupările majore ale epocii sale, şi-i va suscita interesul şi pentru informațiile mai bogate pe care sînt destinate să le aducă broşurile ce vor urma în seria inaugurată acum. Mai mult decît atît: fără a se face vinovat de o prezumție nejustificată, autorul se simte îndreptățit să creadă că nu este exclus ca şi unii specialişti, cu preocupări mai mult sau mai puțin directe în domeniul ştiințelor Pămîntului, să găsească oarecare interes într-o lucrare care, dacă nu le aduce

informații cu totul necunoscute, le-ar putea oferi, totuşi, puncte de vedere noi şi prilejuri de reflexie asupra unor probleme ce le sînt eventual familiare. Şi-apoi, este recomandabil ca, cel puțin din cînd în cînd, să ne oprim pentru a mai vedea şi pădurea, ai cărei copaci ne împiedică adesea, cînd le acordăm prea multă atenție, să o contemplăm în perspectiva largă a ansamblului. Autorul însuşi a constatat, cu ocazia scrierii acestei broşuri, atît utilitatea cît şi plăcerea unei asemenea experiențe.

Putînd fi, în principiu, folositoare şi agreabilă ambelor categorii de cititori menționate mai sus, expunerea celor cîteva „mesaje ale Pămîntului în descifrări actuale”, care constituie obiectul lucrării de față, va putea aduce servicii chiar şi geoştiințelor, cîştigîndu-le prietenii printre oamenii de cultură ținuți departe de ele de esoterismul unor prezentări cifrate — adeseori dar nu totdeauna — prin forța lucrurilor. Aspirînd să servească, în ciuda modestiei dimensiunilor şi cuprinsului ei, şi interesele publicului şi pe acelea ale ştiințelor Pămîntului, în primul rînd, desigur, ale geofizicii, care merită să aibă cît mai mulți prieteni atît printre nespecialişti, cît şi pentru specialiştii altor geoştiințe, această primă broşură dintr-o suită proiectată într-o perspectivă mai largă speră să contribuie, în măsura redusă compatibilă cu caracterul ei, şi la achitarea unei datorii față de planeta noastră, care ne suportă şi ne asigură condițiile de viață. Este vorba de datoria de a avea o cît mai bună cunoaştere şi înțelegere a structurii şi dinamicii Pămîntului, în vederea formării unei concepții corecte despre lume, a unei mai judicioase utilizări a resurselor oferite de Pămînt omului şi a unei mai înțelepte comportări a acestuia față de ceea ce astăzi se desemnează preferențial prin termenul de „mediu ambiant”, în special cînd se fac referiri la atitudini lipsite de cumințenie față de Pămîntul considerat — în ansamblu sau în părți ale sale — ca mediu ambiant al omului.

Formula „Noi şi Pămîntul”, utilizată pentru a denumi suita de lucrări pe care o inaugurează cartea de față, este împrumutată de la Lucian Blaga, în a cărui operă ea apare de două ori, servind la reperarea unei poezii şi a unui aforism. Ea constituie un întreg program. Realizarea lui va însemna, la scara modestei întreprinderi pe care o schițează, şi îndeplinirea unei obligații, îndreptarea unei greşeli, chiar expierea unei crime, după cuvintele lui Caius Plinius Secundus. Căci, spunea acesta acum două mii de ani, după ce enumera blestemățiile de care se fac vinovați oamenii față de „mama Terra”, care le dă totul, „printre crimele ingratitudinii aş vrea să număr şi pe aceea că noi încă nu sîntem familiarizați cum ar trebui cu natura Pămîntului”.

Autorul adresează cititorului o cordială invitație de a participa la încercarea de realizare a unei asemenea familiarizări, pe care o reprezintă scrierea de față.

INTRODUCERE

„Pămîntul e aspru, tăcut, de neînțeles la început,
...
Nu vă descurajați, mergeți înainte; în fața voastră se află lucruri divine, ascunse bine,
Vă jur că în fața voastră se află lucruri divine, mai minunate decît ar fi cuvintele-n stare s-o spună.”
WALT WHITMAN (trad. Mihnea Gheorghiu)

Preocupat de tragicul existenței omeneşti, Albert Camus crede că absurdul, care are un rol însemnat în determinarea lui, se naşte din confruntarea dintre apelul omului şi tăcerea exasperantă a lumii. Că omul adresează lumii nu unul ci numeroase apeluri, în cele mai variate direcții şi sub cele mai variate forme, este în afară de orice îndoială. Să fie, însă, tot atît de sigură şi tăcerea lumii? Nu este, cumva, numai o aparență, rezultată din absența unui receptor adecvat semnalelor pe care le trimite lumea, ca răspuns la solicitările omului, poate şi independent de ele?

Considerînd — şi nu fără justificare — că acesta este cazul şi că, mai mult decît atît, după ce sunt detectate, semnalele se mai cer şi descifrate pentru ca tăcerea să dispară nu numai pe planul recepționării ci şi pe acela al înțelegerii, scrierea de față încearcă să pună la dispoziția omului luminat al zilelor noastre, preocupat şi de „dincolo de cotidian”, cîteva din elementele ce pot conduce la limitarea dacă nu chiar la înlăturarea completă a acelei părți din absurdul lui Camus care provine din confruntarea dintre om şi fracțiunea din lume reprezentată de planeta pe care el trăieşte.

„Noi” şi „Pămîntul” — iată părțile în confruntare, ale căror raporturi reciproce ne interesează din punctul de vedere al cunoaşterii şi înțelegerii Terrei, ca structură şi fenomenologie. Urmărind dublul scop al cunoaşterii nu numai în privința alcătuirii statice ci şi pentru manifestările dinamice ale planetei sale, omul se străduieşte să utilizeze toate mijloacele ce îi stau la dispoziție pentru a trece peste aparenta tăcere a Pămîntului (căci numai de o tăcere aparentă poate fi vorba).

De altfel, problema depăşirii acestei pseudotăceri se pune doar atunci cînd se urmăreşte ceva dincolo de un contact direct cu Pămîntul. Într-adevăr, cunoaşterea şi înțelegerea Pămîntului, cel puțin în anumite perspective, sînt posibile, în primul rînd, pe baza informațiilor „directe”, rezultate din contactul nemijlocit cu obiectul cercetării prin care se urmăreşte a se ajunge la cunoaştere şi înțelegere. Ştiințele Pămîntului care utilizează asemenea metode directe, de o mare varietate — ceea ce a condus la o varietate corespunzătoare de informații, constituind sisteme de cunoştințe care pun în lumină anumite fațete ale structurii şi fenomenologiei terestre — sînt cele care s-au

dezvoltat mai întîi, şi au un caracter precumpănitor descriptiv. Geografia, geologia, paleontologia, mineralogia, petrologia, geochimia,... sînt geodiscipline majore rezultate din cercetări directe, avînd ca obiect anumite aspecte sub care se prezintă Pămîntul sau elemente constitutive ale lui, la diferite scări. Aceste aspecte sînt considerate din diferite puncte de vedere şi abordate cu mijloace de investigaţie de o mare diversitate conceptuală, metodologică şi interpretativă dar cu caracterul comun al contactului direct cu obiectul cercetării.

O a doua posibilitate de a obţine informaţii despre Pămînt, în ansamblu sau privind părţi ale lui, chiar depărtate de locul investigaţiei, este oferită de calea indirectă a utilizării mesajelor emise de Pămînt, ca tot sau ca parte, şi recepţionate la distanţă. Acesta este cazul în care apare problema tăcerii, de care vorbeşte Camus la scară cosmică, pseudotăcere credem noi, cel puţin în cazul Pămîntului. Fapt este că Pămîntul nu numai că răspunde la apelurile ce-i sînt adresate dar lansează şi nesolicitat semnale purtătoare de mesaje. Aduse de semnale-răspuns sau de auto-semnale, mesajele Pămîntului sînt reprezentate de modificări provocate în spaţiu de prezenţa Pămîntului sau a unor părţi ale lui pe care le avem în vedere şi de manifestări diverse ale eliberărilor de energie care însoţesc anumite fenomene ce-şi au sediul în părţile considerate, adică de cîmpuri fizice — deci geofizice — în primul caz, şi de unde şi particule, în al doilea. Studiul unor asemenea mesaje îl întreprinde geofizica, ştiinţă cu un accentuat caracter fizico-matematic, cantitativ. Acest caracter este manifest în cadrul conceptual folosit pentru considerarea structurii şi fenomenelor terestre, în utilizarea de aparate şi metode de măsurare, în tratamentul foarte elaborat al datelor de observaţie obţinute precum şi în interpretarea acestora, pentru stabilirea unei legături cît mai clare între semnalele-efecte studiate şi sursele-cauze ascunse care le-au provocat. Categoric distinctă, prin metodele de investigaţie, de celelalte geoştiinţe, geofizica li se alătură prin comunitatea obiectului căruia le aplică: Pămîntul.

Astfel, în geofizică se studiază, în vederea descifrării, mesajele Pămîntului: se măsoară cîmpuri, se înregistrează unde sau se detectează particule provenind de la surse care pot fi mai mult sau mai puţin depărtate de locul operaţiei respective şi aducînd informaţii privitoare la sursa însăşi şi, uneori, la cele întîlnite pe drumul parcurs. Pe cînd geograful, geologul, paleontologul, mineralogul, petrologul, geochimistul,... sînt în contact direct cu suprafaţa terestră, formaţiunea geologică, fosila, mineralul, roca, sistemul geochimic,... care constituie obiectul cercetării lor, geofizicianul foloseşte drept material iniţial de observaţie particularităţi ale cîmpului gravităţii sau ale cîmpului geomagnetic, o înregistrare de furtună magnetică, date definind un curent teluric, parametri ai unei unde elastice prinse pe o seismogramă, caracteristici ale unui flux de particule constituind un curent electric care circulă în subsol, o emisiune de particule de origine radioactivă, variaţii ale unor mărimi termice etc. Toate acestea reprezintă semnale-efecte ale unor surse-cauze care sînt departe de a fi accesibile direct geofizicianului cercetător şi asupra cărora acesta încearcă să obţină, prin descifrarea mesajelor transmise, informaţii cît mai complete şi mai sigure:

eterogenități în distribuția maselor terestre, un dom de sare sau un anticlinal petrolifer, un zăcămînt de minereu de fier, perturbații în ionosferă şi în electricitatea subsolului, un focar de cutremur de pămînt sau o discontinuitate majoră în interiorul Globului, o ridicare a fundamentului cristalin sub cuvertura sedimentară, un zăcămînt de minereu de uraniu, neomogenități de proprietăți termice în crusta terestră sau în mantaua superioară a Pămîntului etc.

Pămîntul este, deci, departe de a fi tăcut. El trimite omului numeroase şi variate mesaje, pe care acesta trebuie să le detecteze, să le identifice şi să le descifreze. Emise spontan sau transmise ca răspuns la apelul omului, ele au totdeauna un bogat conținut informațional, a cărui exploatare în scopul cunoaşterii şi înțelegerii anatomiei şi fiziologiei planetei noastre constituie probleme vaste şi complexe. Reprezentînd efecte naturale sau provocate, aceste mesaje conduc, pe baza unei valorificări judicioase în cadrul unui proces de interpretare cu numeroase complicații de ordin fizico-matematic şi cu importante implicații larg geonomice sau mai restrîns geologice, la obținerea de informații privind cele mai variate domenii ale Pămîntului, de la porțiunile adînci din nucleul interior la crusta terestră de sub picioarele noastre şi de aici pînă la zonele de mari altitudini în care limita exterioară a magnetosferei se estompează în trecerea spre spațiul interplanetar.

Atît detectarea şi identificarea cît şi descifrarea şi interpretarea mesajelor Pămîntului reprezintă operații dificile, prin problemele fizico-matematice, tehnico-instrumentale şi geonomico-conceptuale pe care le pun şi le cer rezolvate. Cele mai delicate şi complicate dintre acestea sînt, în particular, două: problema raportului dintre semnalul util şi zgomotul perturbant, de care se leagă operația detectării şi identificării mesajelor Pămîntului, şi problema inversă a geofizicii, în ansamblu, care se pune în cadrul operației de descifrare şi interpretare a acestora.

Obiectul primei probleme apare clar din înşişi termenii folosiți pentru a o formula. Semnalul util, reprezentat de mesajul pe care dorim să-l detectăm şi să-l identificăm, este însoțit, de cele mai multe ori, de efecte neinteresante din punctul de vedere al scopului urmărit, acestea constituind un zgomot perturbant. Înainte de a fi supus descifrării, mesajul trebuie identificat cu certitudine, după detaşarea lui din fondul de perturbații, ceea ce constituie o operație cu atît mai puțin dificilă cu cît raportul dintre mesaj (semnal) şi fond (zgomot) este mai avantajos, cu cît semnalul este mai puternic față de zgomotul în mijlocul căruia apare. Se înțelege că îmbunătățirea raportului semnal/zgomot reprezintă un obiectiv important în cadrul metrologiei geofizice, a cărui atingere implică nu numai performanțe instrumentale ci şi un tratament îngrijit al datelor de observație. Cît de importantă este această problemă, care se pune preponderent în primele etape ale procesului de cercetare geofizică, rezultă şi din faptul că, nu de mult, un mare congres i-a fost consacrat în întregime.

Cea de-a doua problemă menționată ca intervenind cu pondere însemnată în investigația geofizică, în etapele centrale şi finale ale descifrării mesajelor fizice ale Pămîntului, se pune mai întîi în termenii unei subtile dar răspicate provocări adresate de Pămînt omului. La apelul acestuia, sau chiar în absența unui asemenea apel, Pămîntul îşi trimite mesajele într-o formă care nu este totdeauna elocventă, aşa încît ele trebuie să fie descifrate. Această descifrare se face, de regulă, în condiții grele căci mesajele reprezintă manifestări parțiale (efect) ale unui sistem (cauză) asupra căruia urmează să se obțină informații cît mai complete, prin parcurgerea în sens invers a drumului de producere a lor: de la efect la cauză.

În acest sens se vorbeşte despre problema ce se cere rezolvată ca despre o problemă inversă. Ea este nedeterminată, adică nu are o soluție unică: pe cînd, dacă se cunoaşte bine cauza, se poate determina fără echivoc efectul, cunoaşterea oricît de precisă şi amănunțită a acestuia nu asigură caracterizarea completă, cantitativă, a cauzei. Este nevoie de tratamente speciale ale datelor de observație care constituie mesajele fizice terestre, de completarea lor cu informații obținute în alt cadru decît cel de detectare a lor, pentru a se putea limita ambiguitatea — fără certitudinea eliminării ei complete —. Astfel, procesul de interpretare, de stabilire a legăturii dintre efectele detectate şi cauzele ascunse, de descifrare a mesajelor Pămîntului rămîne totdeauna afectat de un oarecare grad de nesiguranță, rezultat din această ambiguitate reziduală.

Deosebit de utile în aceste etape ale investigației printr-o anumită tehnică geofizică sînt rezultatele obținute prin alte metode ale studiului fizic al Pămîntului, date furnizate de alte geoştiințe şi chiar contribuțiile altor domenii. Uneori paralele, alteori complementare, asemenea informații venite din afară reprezintă totdeauna un ajutor prețios în finisarea descifrării mesajelor Pămîntului. Recunoscînd utilitatea ambelor categorii de date, paralele şi complementare, este de subliniat, totuşi, contribuția mult mai eficace, în sensul limitării ambiguității în procesul de interpretare, pe care o au cele cu caracter complementar în raport cu conținutul informațional al mesajului supus descifrării. Această afirmație, în formulare cu totul generală, pentru moment încă vag conturată, urmează să fie concretizată şi exemplificată în cazurile particulare care vor fi discutate ulterior, cînd se va arăta efectiv cum ies la lumină lucrurile „ascunse bine” în mesajele Pămîntului, „aspru, tăcut, de neînțeles la început”. Aceasta se va face în paginile următoare, pentru diversele mesaje fizice ale Pămîntului, a căror descifrare este întreprinsă cu mijloace variate, adecvate caracterului mesajului şi planului pe care se pune în valoare conținutul lui de informații, după ce, în prealabil, se vor fi precizat cîteva caracteristici importante ale mesajelor fizice ale Pămîntului.

Cu această indicație, care schițează, în linii mari, structura scrierii de față — pusă, de altfel, în evidență şi de tabla de materii —, cititorul se poate considera introdus, în termeni generali, şi în problemele pentru care i se solicită atenția în cele ce urmează, după ce, în prealabil, a fost informat asupra modului în care se va face abordarea lor.

Se poate porni, deci, la drumul pe care îl are în vedere Whitman în îndemnul cuprins în versurile citate la începutul aceestei introduceri împreună cu asigurarea că la capătul lui se află lucruri minunate. Că sînt lucruri minunate ne-o spune şi Caragiale, în cuvinte cu atît mai surprinzătoare cu cît vin din partea unui scriitor în a cărui operă intervine aproape cu exclusivitate omul, referirile la „lume" sau la partea ei care este Pămîntul fiind cu totul accidentale: „Lumea toată, din miezu-i care e pretutindeni, şi pînă-n fundurile fundurilor, care nicăieri nu se află, este minune, minune şi iar minune".

Cum se dezvăluie această minune, prin descifrarea mesajelor fizice ale Pămîntului, iată ce-şi propun să prezinte paginile ce urmează.

1. MESAJE FIZICE ALE PĂMÎNTULUI

„Tăcere-apăsătoare stăpînea Pămîntul
şi-o întrebare mi-a căzut în suflet, pînă-n fund.
N-avea să-mi spună
nimic Pămîntul? Tot Pămîntu-acesta
neîndurător de larg şi-ucigător de mut,
nimic?"
LUCIAN BLAGA

„Natura vorbeşte cu sine însăşi şi cu noi prin mii de fenomene. Pentru cel atent ea nu este nicăieri moartă, nici mută."
GOETHE

În evidente raporturi de discordanță cronologică, cele două citate aşezate în fruntea acestui capitol sînt, totuşi, mai puțin distonante decît par la prima vedere. Receptivitatea celor doi poeți față de felul în care se manifestă Pămîntul nu este atît de diferită: cuvintele lui Lucian Blaga, scoase dintr-un context poetic destinat a sugera cu totul altceva decît aşteptarea unor mesaje obiective, nu afirmă atît mutenia Pămîntului cît exprimă o îndoială în această privință, iar ale lui Goethe, extrase din proza lui referitoare la probleme ştiințifice, lasă deschisă problema proporției în care elocvența naturii se manifestă ca „autodialog" sau în monolog fără destinație şi în dialogul cu noi. Asocierea unora cu celelalte a fost făcută aici numai pentru a schița, în linii generale, aspectul acestei etape a drumului pe care l-am început: de la aparentă tăcere la locvacitate debordantă din partea Pămîntului.

Ideea principală, expusă deja mai înainte şi care urmează acum să fie dezvoltată, precizată şi exemplificată, este că, departe de a fi mut, Pămîntul ne vorbeşte prin numeroase manifestări, mai mult sau mai puțin evidente, unele naturale (continue sau discrete, periodice sau sporadice), altele provocate (deci cu apariții şi distribuții în timp impuse de noi), şi unele şi altele purtătoare de mesaje bogate în informații. Pentru a ajunge la aceste informații este nevoie, însă, ca mesajele Pămîntului să fie detectate şi descifrate, ceea ce nu este prea simplu în toate cazurile.

Se înțelege că, din punctul de vedere pe care l-am adoptat, nu toate manifestările Pămîntului ne interesează. Din miile de fenomene ale lui Goethe (şi este semnificativ faptul că el foloseşte în acest context cuvîntul „natură"!) vom reține numai pe cele fizice, referitoare, deci, la natura neînsuflețită şi comportînd intervenția unor agenți care afectează starea şi mişcarea unor elemente constitutive ale Pămîntului fără a determina modificări profunde şi ireversibile, care ies din domeniul propriu-zis fizic. De asemenea, vor fi excluse din sfera atenției noastre fenomenele care, rămînînd fizice

prin natura lor, intră, prin scara şi condiţiile de desfăşurare, în domeniul altor ştiinţe. Va fi vorba, aşadar, numai de mesajele fizice ale Pămîntului, în sensul clasic, convenţional, al adjectivului (care la început însemna „natural”: physis = natură), mesaje accesibile studiului cantitativ, fizico-matematic, întreprins de geofizică.

În mod natural, cunoaşterea Pămîntului — ceea ce înseamnă, în acelaşi timp, mai mult şi mai puţin decît natura — a început cu părţile direct accesibile ale Globului terestru, cele de la suprafaţa lui, şi a rămas mult timp limitată la ele, conducînd la constituirea primelor geoştiinţe: geografia şi geologia. În ceea ce priveşte accesul direct al omului la părţile de „deasupra” şi de „dedesubtul” suprafeţei terestre, el a fost şi este încă foarte îngrădit. Dacă drumul „în sus” a fost deschis prin explorarea directă a atmosferei şi continuat prin aceea a ionosferei, a exosferei şi, în fine, a spaţiului cosmic, drumul „în jos” n-a fost încă parcurs — cu excluderea celor cîţiva kilometri străbătuţi de foraje şi reprezentînd numai cu ceva mai mult decît o miime din raza Pămîntului — decît de imaginaţia lui Jules Verne. Tentaţia de a întreprinde drumul în jos, spre adîncimi cît mai mari, nu a lipsit. Nu demult s-au făcut pregătiri foarte înaintate pentru executarea unui foraj care să străpungă crusta terestă (proiectul Mohole), alegîndu-se, în acest scop, o zonă marină, unde grosimea crustei Pămîntului este mai redusă şi pe unde voia şi George Călinescu să întreprindă o călătorie în interiorul Pămîntului:

„De-aş fi avut putere,
Desigur pe sub mare mergeam spre Centro Terrae...”

Dar „puterea” a lipsit şi oamenilor de ştiinţă şi tehnicienilor, nu numai poetului. Proiectul nu s-a realizat deocamdată şi prea mult în jos nu se va putea merge niciodată.

Totuşi, cercetarea avînd ca obiect atît părţile de sus cît şi cele de jos ale Pămîntului a fost posibilă pe cale indirectă şi a permis cunoaşterea structurii şi fenomenologiei acelor părţi precum şi înţelegerea lor pînă la detalii şi cu o precizie de multe ori surprinzătoare. Metodele fizico-matematice folosite în acest scop s-au dovedit deosebit de eficace. Prin adaptarea lor la obiectul studiat, la natura, dimensiunile şi cadrul lui, ca şi prin ansamblul rezultatelor obţinute, s-a ajuns la constituirea unui grup coerent de discipline, fizice prin metodă şi „geo” prin obiect, care reprezintă astăzi ştiinţa cantitativă a Pămîntului: geofizica.

Manifestările fizice ale planetei noastre sînt numeroase şi extrem de variate ca natură, ca ordin de mărime, ca distribuţie în spaţiu, ca evoluţie în timp. Gravitatea, magnetismul terestru, radioactivitatea Pămîntului, fenomenele legate de căldura degajată de Glob, cutremurele de pămînt şi cortegiul de fenomene asociate, toate acestea prezintă o mare varietate în felul în care se fac perceptibile omului şi în care sînt accesibile studiului cantitativ specific disciplinelor geofizice: gravimetria,

geomagnetismul, geoelectricitatea, georadioactivitatea, geotermia, seismologia, tectonofizica, prospecțiunile geofizice.

O examinare mai de aproape a substratului fizic al acestor manifestări, atît de diverse, permite, totuşi, să se recunoască oarecare unitate în varietate şi să se simplifice modul de abordare a cunoaşterii şi înțelegerii lor. Oricît de diferite ar fi fenomene ca oscilația unui pendul şi orientarea unui ac magnetic, degajarea de căldură din subsol într-o regiune termală şi efectele unui cutremur de pămînt, sau manifestările radioactive deasupra unor formațiuni conținînd uraniu şi furtunile magnetice legate de perturbațiile din ionosferă, ele prezintă, totuşi, ceva comun în mecanismul fizic al producerii lor: în prima pereche de fenomene se manifestă efecte de cîmp, în a doua se recunosc efecte de unde, în a treia apar efecte de particule.

Cu aceasta am ajuns în miezul problemei ce ne preocupă şi care se poate enunța acum în termeni expliciți: mesajele fizice ale Pămîntului se încadrează în cele trei tipuri de entități ale lumii materiale: cîmpuri, unde şi particule. Mai întîi, Pămîntul posedă cîmpuri proprii (cîmpul gravității, cîmpul geomagnetic) şi este supus acțiunii unor cîmpuri de natură comparabilă dar de origine extraterestră (cîmpurile gravitaționale ale Lunii şi Soarelui şi, la ordine de mărime mult mai reduse, ale planetelor din sistemul solar). Apoi, el eliberează energie sub formă de unde, fie electromagnetice (radiațiile gama emise de formațiunile geologice radioactive şi radiațiile infraroşii care se manifestă în fenomenele geotermice), fie elastice (diversele unde seismice care pleacă din focarele cutremurelor de pămînt) sau primeşte din afară unde electromagnetice, fie de la Soare (o gamă întreagă de radiații, dintre care cele mai importante pe plan geofizic sînt razele X şi razele ultraviolete, situate de o parte a spectrului vizibil, şi razele infraroşii, purtătoare ale căldurii solare, de cealaltă parte), fie din spațiul interplanetar sau chiar de mai departe (radiații cosmice). În fine, Pămîntul emite particule (radiațiile alfa şi beta, care-şi au originea în aceleaşi formațiuni radioactive ca şi radiațiile gama, de natură electromagnetică), este străbătut de fluxuri de electroni (curenți telurici din interiorul adînc al Globului, responsabili de producerea cîmpului geomagnetic principal şi a unor variații geomagnetice sau a unor părți ale lor) sau este bombardat de fluxuri de particule purtătoare de sarcini electrice de ambele semne („vîntul solar”).

Cîmpurile, undele şi particulele se pot manifesta pînă la distanțe mari de sursa lor şi reprezintă mesajele fizice naturale ale Pămîntului. Ele aduc, în locul în care sînt detectate, informații despre condițiile din locul de origine (respectiv din locul unde au suferit modificările detectate, în cazul mesajelor de origine extraterestră). Adesea, în conținutul de informații al cîmpurilor, undelor şi particulelor se pot identifica şi descifra elemente privind mediul dintre sursă şi locul detecției, respectiv informații despre fenomene ce au avut loc de-a lungul drumului parcurs (reflexii şi refracții şi cauzele lor, absorbții şi mecanismul lor fizic etc.).

Pe lîngă aceste mesaje naturale, Pămîntul ne poate comunica altele, ca răspuns la solicitări pe care i le-am adresa sub aceleaşi trei forme, deci mesaje provocate. El este în stare să reacţioneze, părţile lui supuse solicitării devenind sediul unor surse de cîmpuri, unde şi particule, să le zicem secundare. Astfel, de exemplu, se pot provoca în subsol curenţi electrici, ale căror particularităţi, legate de condiţiile din subsol, se pot studia fie prin intermediul cîmpului magnetic produs, fie cu ajutorul parametrilor ce definesc însuşi fluxul de particule reprezentat de curenţi. De asemenea, este posibil să se provoace artificial unde elastice — cazul atîtor explozii subterane, nucleare sau „convenţionale" — sau unde electromagnetice, în particular în domeniul hertzian, cu care să se exploreze interiorul Globului (sondaje seismice), respectiv zonele din afara lui (de exemplu, sondaje electromagnetice ionosferice). În fine, se utilizează procedee artificiale şi pentru provocarea unor emisiuni de particule, reprezentînd, de asemenea, mesaje purtătoare de informaţii asupra porţiunilor Pămîntului afectate de ele, în locul de producere sau pe parcursul străbătut de acolo pînă la locul punerii lor în evidenţă. Astfel de investigaţii, pe baza mesajelor provocate, se pot efectua într-o gamă întreagă de situaţii, de la scară cu totul locală (ca în studiul radioactiv al găurilor de sondă) pînă chiar la scară planetară (ca în cazul injectării de electroni în ionosferă, pentru provocarea unor perturbaţii în sistemul de curenţi de acolo şi în cîmpul perturbaţiilor geomagnetice corespunzătoare). Mesajele provocate prezintă marele avantaj al eliminării unor parametri dintre cei care intervin în determinarea fenomenului corespunzător, ceea ce aduce simplificări remarcabile în procesul descifrării şi interpretării lor.

Există, astfel, cele două categorii de mesaje fizice ale Pămîntului: mesaje naturale şi mesaje provocate, în fiecare din ele găsindu-se cele trei tipuri: cîmpuri, unde şi particule. Fără a intra în prea multe detalii, este, poate, cazul să scoatem în evidenţă principalele caracteristici ale celor trei tipuri de mesaje care ne pot veni din partea Pămîntului, fie în mod natural, fie prin provocare.

Noţiunea de cîmp poate fi conturată, într-o primă aproximaţie, cu ajutorul unuia din elementele care o definesc: prezenţa unei anumite proprietăţi fizice într-un domeniu al spaţiului. De exemplu, în spaţiul din jurul unei mase materiale se manifestă acţiunea ei atractivă, caracterizată cantitativ de legea lui Newton. Atracţia nu poate fi pusă în evidenţă decît prin intermediul unei alte mase, asupra căreia să se exercite acţiunea celei care „produce cîmpul". Se presupune, totuşi, că, potenţial, proprietatea există şi în absenţa masei atrase, care îndeplineşte rolul de martor, pentru punerea în evidenţă a cîmpului caracterizat de această proprietate. Masa atractivă imprimă, deci, spaţiului din jurul ei proprietatea respectivă, transformînd domeniul spaţial în care acţiunea ei se resimte într-un cîmp — în acest caz, cîmp gravitaţional —, ea constituind, astfel, sursa cîmpului. La fel, în jurul unui magnet sau al unui corp magnetizat ori al unui circuit electric străbătut de un curent continuu, spaţiul se bucură de proprietăţi speciale: în fiecare punct al lui un ac magnetic este supus unei acţiuni de orientare, anumite substanţe se magnetizează, un circuit conductor deplasat

în anumite condiții devine, dacă este închis, sediul unui curent electric etc. Toate aceste acțiuni caracterizează un cîmp magnetic; deci magnetul, corpul magnetizat sau curentul electric continuu în jurul căruia se constată asemenea acțiuni reprezintă surse de cîmp magnetic. Spațiul dotat cu proprietăți fizice va reprezenta, aşadar, un cîmp. Cele două exemple amintite mai sus corespund celor două principale cîmpuri geofizice: cîmpul gravității (care nu este, însă, pur atractiv) şi cîmpul geomagnetic, de asemenea cu o structură mai complicată, fiind determinat de cauze complexe. Considerarea lor ca mesaje implică descifrări care constau, în esență, în rezolvări de probleme inverse.

Conținutul noțiunii de undă este mai uşor de pus în evidență în cazul unei unde elastice. Dacă într-un mediu elastic, caracterizat prin tendința pe care o are ca, deformat fiind, să revină — după încetarea cauzei deformării — la condițiile inițiale, se produce deplasare unui punct, revenirea acestuia în poziția inițială afectează şi punctele vecine din mediu, legate „elastic” de punctul deplasat. Deformarea corespunzătoare deplasării se propagă, din aproape în aproape, în mediu, dînd naştere unei „unde”, entitate fizică cu o dublă periodicitate: în spațiu, caracterizată prin lungimea de undă, şi în timp, caracterizată prin perioadă (sau inversul ei: frecvența). Dacă în mediul elastic în care se propagă o undă se consideră, pe dreapta coincidentă cu direcția de propagare, puncte a căror mişcare se face în condiții comparabile la un moment dat — puncte care sînt în aceeaşi fază —, distanța dintre două asemenea puncte vecine reprezintă chiar lungimea de undă. Pe de altă parte, intervalul de timp după care un anumit punct din mediul elastic, în care se propagă unda, se găseşte în aceeaşi „stare de mişcare”, definită ca „fază”, este perioada iar numărul de perioade dintr-o secundă este frecvența mişcării ondulatorii. Mutatis mutandis, cu tot substratul fizic diferit, cele spuse despre undele elastice se pot extinde şi la undele electromagnetice; în ceea ce priveşte simbolismul matematic în care se exprimă fenomenul, el este identic în cele două cazuri.

În legătură cu cea de-a treia categorie de mesaje, reprezentată de particule, ne vom limita să spunem că, în mod curent, este vorba, în geofizică, de principalele particule elementare care intră în alcătuirea materiei: electroni, protoni şi neutroni, la care se adaugă şi unii ioni pozitivi, în particular particula alfa. Ele se manifestă prin energia lor, corespunzătoare caracteristicilor lor şi particularităților cîmpului în care se propagă; în special acesta este cazul pentru particulele cu sarcină electrică. Particulele încărcate electric sînt supuse şi acțiunii de deviere pe care o exercită cîmpul magnetic asupra lor, lucru care se manifestă într-o serie întreagă de fenomene geomagnetice, cu prelungiri în procesele asociate lor; deviațiile în cîmp electric nu vin în vedere decît cu totul excepțional în context geofizic. Pentru toate particulele este importantă, în scopul descifrării mesajelor geofizice pe care le reprezintă, interacțiunea lor cu mediul, în special manifestarea influenței mediului asupra lor, aşa cum apare ea în fenomenele de absorbție.

Potențialul informațional al mesajelor fizice ale Pămîntului este în general ridicat şi nu totdeauna exploatat în întregime. Bogăția de informații cuprinse în datele de observație reprezentate de cîmpuri, unde şi particule, ca obiect de studiu în cercetările geofizice, este legată de extinderea spațială a domeniului la care se referă aceste informații — depăşind cu mult, de regulă, regiunea sursei lor — şi, uneori, şi de extinderea în trecut a conținutului lor documentar. Cîmpul gravității are ca sursă întreaga distribuție de mase care formează Pămîntul, cuprinzînd suplimentar şi efectul rotației terestre precum şi influențele atracției gravitaționale a Lunii şi Soarelui, iar cîmpul geomagnetic este determinat, în partea lui principală, de cauze situate în interiorul adînc al Globului terestru şi, în părțile variabile în timp, de fenomene complexe din ionosferă şi magnetosferă. Ca atare mesajele pe care le constituie aceste cîmpuri conțin informații privind domenii spațiale de mare extindere, cu părți foarte îndepărtate de locul măsurării sau înregistrării, în general chiar în principiu inaccesibile observației directe.

Deşi fenomenologia este cu totul diferită, situația se prezintă cu multe asemănări, în privința capacității de informare, şi pentru categoria de mesaje fizice reprezentată de unde. Aşa, de exemplu, undele seismice care provin din focarul unui cutremur de pămînt pot fi înregistrate în diverse puncte de pe Glob, pînă la antipodul epicentrului, după ce au străbătut întregul interior al Pămîntului, suferind reflexii şi refracții la suprafețele şi în zonele de discontinuitate a proprietăților elastice ale acestuia. Ele aduc, în consecință, informații asupra condițiilor în care au fost generate ca şi asupra acelora întîlnite pe traseul propagării lor, într-o suprapunere a cărei complexitate este accentuată de adăugarea influențelor locale ale înregistrării. Exploatarea acestui bogat conținut de informații rămîne de cele mai multe ori parțială, atît datorită complexității intrinsece a ansamblului cît şi caracterului invers al problemelor ce trebuie rezolvate. În privința mesajelor aduse de undele electromagnetice se poate constata aceeaşi bogăție de conținut, asociată cu o şi mai mare varietate şi cu o extindere spațială care depăşeşte cu mult limitele exterioare ale Globului terestru. Dacă undele electromagnetice emise de Pămînt, adică radiațiile infraroşii prin intermediul cărora acesta îşi radiază căldura internă, conțin numai informații privitoare la interiorul Globului, cele venite de la Soare, în particular radiațiile X şi cele ultraviolete, mijlocesc informații asupra atmosferei înalte, unde ele suferă modificări şi provoacă fenomene cu efecte accesibile determinărilor cantitative: ionizări şi curenți electrici în ionosferă, variații ale cîmpului geomagnetic, curenți telurici.

Particulele, pe de altă parte, pot aduce informații asupra condițiilor în care au fost emise şi asupra fenomenelor care au loc în mediul în care se propagă. Aceste informații sînt interesante mai mult prin natura lor — complementară față de aceea a datelor furnizate de cîmpuri şi unde — decît prin domeniul la care se referă, aproape totdeauna restrîns, datorită puterii de pătrundere reduse a lor (cazul particulelor alfa şi beta). Considerate, însă, global sub forma de curenți electrici în interiorul Globului sau în ionosferă, particulele (de astă dată electroni) îşi ridică potențialul informațional

în mod sensibil, atît prin bogăție şi varietate cît şi prin extinderea spațială.

Despre posibilitatea unor investigații privind trecutul Pămîtului, pe care am amintit-o mai înainte pentru a sublinia amploarea conținutului informațional al mesajelor fizice ale acestuia, va fi vorba în capitolele viitoare, în legătură cu paleomagnetismul şi cu geocronologia. Pentru moment vom menționa numai că determinarea cantitativă a magnetizării rocilor, ca orientare şi ca intensitate, poate furniza date asupra cîmpului geomagnetic din epoca formării rocilor respective, iar studiul produşilor rezultați din dezintegrările radioactive, deci ca urmare a emisiunii de particule (dar în trecut), este în stare să conducă la informații cantitative asupra lungimii intervalelor de timp în care aceşti produşi s-au format, deci asupra vîrstei formațiunilor geologice corespunzătoare.

În rezumat, deci, mesajele fizice ale Pămîntului, reprezentate de cîmpuri, unde sau particule, fie naturale fie provocate, ne aduc informații privind pînă şi cele mai depărtate zone ale Globului terestru, de la părțile centrale ale nucleului interior, care nu vor putea fi niciodată cercetate direct, pînă la limitele magnetosferei, recent atinse de vehicule spațiale dotate cu instrumente în stare să furnizeze informații discrete asupra regiunilor străbătute, informații complementare în raport cu datele globale ale mesajelor geofizice. Mesajele Pămîntului, pe care trebuie să le descifreze geofizica, extind, astfel, considerabil în spațiu raza sferei noastre de investigație. Mai mult decît atît, în unele cazuri este posibil să se opereze, cu ajutorul lor, şi o extindere în trecut a investigației. Dacă mai ținem seama şi de faptul că, uneori, se poate face şi o extrapolare pentru viitor a unor situații constatate ca stadii permanente ale unei evoluții urmărite în trecut, rezultă că mesajele fizice ale Pămintului, bine descifrate, ne pot deschide cele trei porți de acces la cunoaştere, despre care vorbeşte Dimitrie Cantemir. În cuvintele lui, citate de Nicolae Iorga, „în trei chipuri şi ca prin trei porți înlăuntrul palaturilor cunoştinței lucrurilor a întra putem: prin pildele celor trecute, prin deprinderea cestor de acum şi prin bună socoteala celor viitoare". Trebuie, totuşi, să recunoaştem că, dacă poarta prezentului este — în cazul de care ne ocupăm — larg dată înapoi, cea a trecutului este doar parțial deschisă, iar a viitorului de-abia întredeschisă, şi numai cu intermitențe.

În încheiere, să mai facem o precizare, în continuarea ideii deja exprimate că mesajele fizice ale Pămîntului au fost şi mai sînt încă numai parțial exploatate. A recunoaşte bogăția lor de informații nu înseamnă, neapărat, a afirma că ea ne este efectiv accesibilă, în întregime. Chiar bine prinse şi înregistrate, mesajele acestea mai trebuie descifrate. Progresele mari, realizate în ultimul timp în domeniul metrologiei geofizice, au permis tot mai fidele înregistrări, în urma îmbunătățirii raportului semnal/zgomot, şi chiar descifrări din ce în ce mai eficace, prin tratamentul adecvat al datelor de observație.

S-au obținut rezultate foarte bune în privința asigurării unui material de

observație de încredere, bogat şi precis, acoperind spațial şi temporal domenii suficient de ample pentru ca gradul lor de semnificație să fie ridicat. De asemenea, descifrarea mesajelor pe care acest material le reprezintă s-a făcut în condiții mereu îmbunătățite, limitate, totuşi, de caracterul de problemă inversă al procesului de descifrare-interpretare.

Din conținutul bogat şi variat al informațiilor cuprinse în mesajele fizice ale Pămîntului, mult a fost, deci, scos deja la lumină. Mai rămîne, însă, desigur, încă mult de valorificat. Ținînd seama de bogăția lor de conținut informațional şi de caracterul limitat al valorificărilor realizate pînă acum, prin descifrare şi interpretare, aproape că am putea atribui acestor mesaje calitatea eresurilor lui Eminescu: „abia-nțelese, pline de-nțelesuri”.

2. MANIFESTĂRI TERESTRE ALE ATRACȚIEI UNIVERSALE

„... Tot ce-a chinuit altădată
Mintea-nțelepților vechi şi tot ce frămîntă zadarnic
Şcolile noastre cu lărmuitoare dezbateri, în față
Astăzi privim, căci ştiința lui Newton împrăştie norii.
...
...
Cerul înalt îl ajungem cu mîna ş-acuma se vede
Tainița oarb' a Pămîntului..."
EDM. HALLEY (trad. Teodor A. Naum)

„Cînd Newton a formulat legea gravitației el n-a spus că Soarele ori Pămîntul ar avea proprietatea de a atrage; el a spus doar că orice corpuri, de la cele mai mari pînă la cele mai mici, par a avea proprietatea de a se atrage reciproc, adică lăsînd la o parte problema cauzei mişcării corpurilor, a formulat o proprietate comună tuturor corpurilor, de la cele infinit de mari, pînă la cele infinit de mici."
TOLSTOI

Este un fapt de observație banală că orice corp din natură cade spre Pămînt dacă, nefiind susținut, este liber s-o facă. De aici rezultă că el este supus unei forțe şi, cum aceasta se manifestă peste tot în spațiul terestru, înseamnă că sîntem în prezența unui cîmp, în sensul indicat în capitolul precedent.

Forței acesteia, care nu este altceva decît greutatea corpului respectiv şi este proporțională cu masa lui, îi corespunde o accelerație egală cu intensitatea cîmpului, mărime care se numeşte gravitate (de la cuvîntul latin gravitas, care înseamnă greutate; a nu se confunda cu termenul gravitație, derivat din cuvîntul latin gravitatio, cu sensul de atracție). Greutatea, deci forța sub acțiunea căreia corpul tinde să cadă — luînd, în „cădere liberă", o mişcare uniform accelerată, definită fără ambiguitate de gravitate —, este rezultanta a două forțe: forța de atracție (de gravitate), exercitată asupra corpului de ansamblul maselor terestre, şi forța centrifugă, căreia îi este supus corpul în virtutea participării lui la rotația Pămîntului în jurul propriei axe. Cîmpul corespunzător, adică domeniul spațial în care se resimte această influență complexă a atracției maselor terestre şi a mişcării de rotație a Pămîntului, influență datorită căreia corpurile de pe Pămînt sînt grele, este unul din cîmpurile fizice principale ale Pămîntului, numit cîmp gravific sau cîmp al gravității. El reprezintă — în terminologia pe care am convenit s-o adoptăm — un mesaj de prim ordin al planetei noastre.

Partea cu mult cea mai importantă a greutății este componenta ei gravitațională. Componenta corespunzătoare forței centrifuge este, evident, nulă la pol pentru a

atinge la ecuator, unde este maximă, abia o treime de procent din partea atractivă. Se înțelege, astfel, că practic nu se face o eroare prea mare considerîndu-se greutatea ca datorită atracției Pămîntului, neglijîndu-se deci intervenția forței centrifuge, cu alte cuvinte confundîndu-se cîmpul gravific cu cîmpul gravitațional. De altfel, în geofizică, în particular în utilizarea variațiilor gravității la studiul structurii subsolului, adică în prospecțiunile gravimetrice, se elimină prin calcul, în cadrul tratamentului datelor de observație, efectul corespunzător rotației terestre, aşa încît mărimile cu care se operează sînt elemente ale cîmpului gravitațional şi nu ale celui gravific. Totuşi, cîmpul real este acesta de pe urmă şi, la precizia atinsă astăzi în măsurători, se prinde nu numai efectul rotației terestre ci şi chiar acela al atracției Lunii şi a Soarelui.

Atracția exercitată de Pămînt asupra corpurilor din spațiul care-l înconjoară — asimilabilă, în condițiile indicate mai sus, cu greutatea lor — reprezintă un caz particular al unui fenomen cu totul general, atracția universală. Într-adevăr, în mişcarea Lunii în jurul Pămîntului şi a acestuia în jurul Soarelui, se manifestă de asemenea acțiunea unor forțe, căci mişcările respective nu se efectuează pe traiectorii în linie dreaptă cum ar trebui să se întîmple în absența oricărei forțe.

Luînd în considerare căderea corpurilor la suprafața Pămîntului şi privind şi abaterea constantă a traiectoriilor Lunii şi planetelor de la linii drepte tot ca o continuă cădere spre Pămînt, respectiv spre Soare, „marele Newton" — cum îl numeşte Voltaire — a avut puterea de sintetizare şi abstracție necesară pentru a vedea în toate aceste fenomene intervenția unei cauze unice: atracția dintre corpul care cade (corpul atras) şi acela spre care cade (corpul atractiv). Mai mult decît atît: deşi observația curentă, cu mijloacele care ne stau în mod obişnuit la îndemînă, nu arată că ar exista forțe de atracție între corpurile de dimensiuni mai reduse — deci de mase mai mici — de pe Pămînt, Newton a avut şi intuiția generalității fenomenului, postulînd universalitatea lui, adică existența atracției între toate corpurile din Univers, la orice scară.

Faptul că atracția se constată direct numai cînd cel puțin unul din corpuri este „mare" — numai pentru asemenea corpuri sîntem îndemnați să facem, într-o primă etapă, distincție între corpul „atractiv" şi corpul „atras", atracția fiind, de fapt, în toate cazurile, reciprocă — se datoreşte valorii foarte mici a „constantei gravitației universale". Această mărime intră, în expresia matematică a legii lui Newton, ca factor de proporționalitate între forța de atracție şi raportul dintre produsul maselor corpurilor ce se atrag şi pătratul distanței care le separă.

Extinderea legii lui Newton la atracția dintre corpuri oarecari — după ce ea fusese stabilită şi verificată pentru corpuri cereşti — reprezintă o generalizare cu vaste implicații teoretice şi practice, confirmată a posteriori de concordanța tuturor concluziilor deduse din ea cu realitatea. Atunci cînd au fost asigurate condițiile necesare pentru verificări, la scări adecvate ordinului de mărime al fenomenelor de pe

Pămînt, s-au obținut rezultatele aşteptate, cu precizie impresionantă.

În această ordine de idei este indicat să amintim o descifrare de mesaj gravitațional al Pămîntului care, fără a fi recentă, rămîne permanent actuală, situîndu-se pe primul plan al informațiilor geofizice asupra Pămîntului ca planetă; această informație a fost reliefată, de altfel, prin determinări moderne care au confirmat rezultatele celor de acum aproape trei secole. Este vorba de mesajul pe care îl reprezintă valoarea medie a gravității la suprafața Globului, valoare care asociată cu aceea a constantei gravitației conduce la stabilirea valorii numerice a masei Pămîntului. Pe această cale s-a reuşit să se „cîntărească" Pămîntul, determinîndu-i-se masa (circa şase sixtilioane de tone). Ținîndu-se seama de dimensiunile Pămîntului, furnizate de geodezie, rezultă de aici o valoare medie a densității maselor terestre de 5,51 g/cm^3. Cum stratele superioare ale scoarței terestre au o densitate medie de circa 2,7 g/cm^3, urmează că în interiorul Pămîntului trebuie să existe densități mult mai mari, concluzie oarecum naturală şi confirmată de seismologie.

Pregătită de cunoştințe destul de precise cu privire la căderea corpurilor şi la mişcarea planetelor, ca şi de măsurători directe ale gravității în diverse puncte de pe Glob, legea gravitației universale a jucat un rol primordial în dezvoltarea ştiinței, în particular în aceea a mecanicii cereşti şi a gravimetriei, disciplina geofizicii care se ocupă cu variatele aspecte ale manifestărilor terestre ale atracției universale. Cît de mare a fost „impactul" nu numai ştiințific dar general cultural al „descoperirii" atracției universale se vede şi din faptul că ea a trezit ecouri şi în opere literare şi filozofice. Să amintim, fără a intra în amănunte, că Voltaire, care a fost cel mai fervent propagator al ideilor lui Newton în Franța, le-a îmbrăcat în haine literare, că Bergson a considerat că însăşi „viziunea pe care o avem despre lumea materială este aceea a unei greutăți care cade", că Longfellow este impresionat de faptul că „orice săgeată care zboară simte atracția Pămîntului", că George Călinescu îşi compară propria stabilitate sentimentală cu aceea a aştrilor ținuți pe orbite de atracție:

„Din osie să scoți
Încerci, Til, în zadar
Sistemul planetar.

Să mă abați nu poți
Aştrii mereu mă trag."

Este interesant şi important de semnalat că legea atracției universale este o lege pur descriptivă. Enunțată în termeni sobri de Newton, ea nu explică nimic, nu se referă — aşa cum remarcă şi Tolstoi în citatul din „Război şi pace" pus în fruntea acestui capitol — la cauza atracției. Tocmai în legătură cu aceasta a formulat Newton celebrul său „Hypotheses non fingo", cuprins în următorul context: „... pînă acum nu am putut încă afla cauza acestor proprietăți ale gravității şi nu imaginez ipoteze. Căci

orice nu se deduce din fenomene trebuie numit ipoteză; şi ipotezele fie metafizice, sau fizice, sau ale calităților oculte, sau mecanice, nu au loc în filozofia experimentală."

●

Din punctul de vedere al obiectivelor urmărite de noi, atracția universală interesează prin manifestările ei terestre, cu funcțiunea lor de mesaje fizice ale Pămîntului. Acestea intervin în diverse fenomene, în forme afectate şi de rotația terestră, deci sub aspectul lor de efecte ale cîmpului gravității. Viziunea pur geometrică a cîmpului trebuie întregită, în vederea conturării prelungirilor lui fenomenologice, cu un element fizic important, legat de energia potențială corespunzătoare masei unitare situate într-un punct anumit din cîmp, numit pe scurt potențial al punctului respectiv. Noțiunea de potențial are o importanță deosebită în studiul cîmpului gravității (ca şi în al altor cîmpuri „potențiale", cum sînt cîmpul gravitațional şi cîmpul geomagnetic), pentru sensul fizic care-i corespunde şi, mai ales, pentru o proprietate remarcabilă a expresiei lui matematice, aceea că, într-un punct dat, valoarea potențialului are o legătură determinată cu intensitatea cîmpului în acel punct. Cum intensitatea cîmpului se numeşte pe scurt „cîmp" (în cazul pe care-l considerăm este chiar gravitatea) şi cum legătura este una de deducere a acestei mărimi din potențial (pentru cazul gravității: geopotențial), se spune simplu: cîmpul derivă din potențial. Termenul „derivare", care pentru nespecialist sugerează doar descendență, indică de fapt şi (sau mai ales) o operație matematică prin care se trece de la expresia potențialului la aceeea a cîmpului, de la geopotențial la gravitate.

Mărimea fundamentală a cîmpului gravității, care intervine sub aspecte variate în numeroase manifestări ale acestuia privitoare la Pămînt, este chiar gravitatea. Derivată teoretic din potențialul corespunzător, numit — cum am spus — geopotențial, ea se măsoară practic direct şi este mărimea primordială a gravimetriei, chiar prin această accesibilitate directă la determinarea cantitativă precisă — în special pentru variațiile ei — ca şi prin sensul fizic şi rolul ei în toate manifestările cîmpului gravific. Conținînd ca parte principală, în valoarea măsurată, influența atracției ansamblului maselor terestre dar, suprapuse peste aceasta, şi influențele ce-i drept mult mai reduse ale rotației Pămîntului şi ale atracției Lunii şi Soarelui, gravitatea poate fi eliberată, prin calcul, de aceste influențe secundare, considerate ca „zgomot". O asemenea eliberare se face, bineînțeles, numai în cazul că se urmăreşte exclusiv punerea în evidență a unor particularități ale distribuției cîmpului, legate de distribuția de mase din interiorul Globului.

Descifrarea conținutului informațional al mesajului complex al Pămîntului pe care-l reprezintă gravitatea se face în acord cu scara cercetării şi cu scopul urmărit, după un prealabil tratament adecvat al datelor de observație. Nu este cazul să intrăm în detalii de ordin tehnic privind acest tratament dar putem semnala că el oferă posibilitatea de a se pune în evidență un efect sau altul, din ansamblul conținut în

mesajul global, trecînd în fondul de zgomot şi eliminînd ca atare ceea ce nu interesează cercetarea întreprinsă. Astfel, atracția luni-solară se elimină ca efect perturbant dacă se urmăreşte, în prospecțiunile gravimetrice de înaltă precizie, cunoaşterea structurii subsolului dar este detectată şi înregistrată ca semnal util în cercetările privind mareele terestre, fenomen asemănător, ca manifestare şi prin cauzele lui, cu fluxul şi refluxul mării. De asemenea, în cadrul prospecțiunilor gravimetrice avînd ca obiectiv cunoaşterea structurii crustei terestre sub un anume nivel de referință, se înlătură prin calcul partea din variațiile gravității ce se constată în măsurătorile executate la suprafața Pămîntului, deci pe un teren variabil, la diverse altitudini şi cu un substrat geologic diferind de la un punct la altul, parte care corespunde influențelor de suprafață. Aceste influențe, efecte ale reliefului şi ale compoziției maselor crustale de deasupra nivelului de referință adoptat, sînt menținute, însă, în valorile gravității care urmează să se folosească în studii privind echilibrul general al crustei Pămîntului, căci ele reflectă tocmai participarea maselor respective la realizarea sau la deranjarea acestui echilibru.

Pregătite printr-un astfel de tratament adaptat scopului urmărit de cercetare şi, de cele mai multe ori, comparate cu valori teoretice corespunzătoare unui model adoptat convențional ca „normal”, deci prezentate ca abateri de la aceste valori sau — cum se zice în mod curent — ca „anomalii gravimetrice”, datele de observație reprezentate de variațiile gravității urmează să fie descifrate pentru punerea în evidență a informațiilor conținute în mesajul pe care ni-l aduc din partea Pămîntului. Această punere în evidență şi valorificarea gnoseologică ulterioară se fac pe planuri, la scări şi cu scopuri diferite. Schematizînd puțin situația dar subliniind că limitele dintre domeniile ce vor fi indicate nu sînt nete ci rezultă din idealizarea unor zone de tranziție, adeseori largi, putem distinge trei categorii de descifrări ale mesajelor Pămîntului reprezentate în fond de gravitate, chiar dacă formele sub care se înfățişează ea sînt foarte diferite: (1) pe plan geofizic-geodezic, la scară planetară-continentală, în scopul obținerii de informații asupra formei Pămîntului şi asupra proprietăților fizice globale ale maselor care îl alcătuiesc; (2) pe plan geofizic-geodinamic, la scară continentală-regională, pentru cunoaşterea stării de echilibru în care se găsesc masele terestre sau a manifestărilor eventualei absențe a echilibrului; (3) pe plan geofizic-geologic, la scară regională-locală, în vederea stabilirii structurii porțiunilor de suprafață ale Pămîntului, în particular a crustei terestre.

•

Problema formei Pămîntului este de fapt, în primul rînd, o problemă a geodeziei, care a abordat-o inițial cu mijloace pur geometrice. Treptat, metrologia geodezică a căpătat un substrat tot mai bogat în elemente fizice, ceea ce a condus la o geodezie gravimetrică (uneori numită chiar gravimetrie geodezică), avînd ca obiect studiul formei Pămîntului pe baza măsurătorilor gravității, ca principal element de caracterizare a cîmpului gravific.

Dat fiind că problema formei Pămîntului urmează să constituie subiectul unei alte broşuri din seria „Noi şi Pămîntul", vom lăsa pe seama acesteia expunerea evoluției istorice şi a detaliilor mai semnificative care caracterizează principalele etape ale rezolvării ei, limitîndu-ne aici doar la indicarea descifrării actuale a mesajului gravimetric corespunzător. Reprezentat, în esență, de ansamblul valorilor care definesc distribuția geografică a gravității, acest mesaj are un conținut de informații privitoare la forma planetei noastre care poate fi intuit relativ uşor. Într-adevăr, este de ajuns pentru aceasta să ne gîndim că geometria formei nu poate fi independentă de conținutul fizic al Globului terestru şi că acest conținut fizic se manifestă, printre altele, prin cîmpul gravific. Cum partea acestui cîmp corespunzătoare rotației este cea care determină forma generală a Pămîntului, într-o primă aproximație forma unui elipsoid de rotație turtit, urmează că structura fină a formei reale a Pămîntului, reprezentată de abateri de la elipsoid, trebuie să se manifeste în partea gravitațională a cîmpului şi că, prin urmare, studiul amănunțit al acestei părți va putea conduce la informații prețioase asupra formei Pămîntului, cu grade de detaliere corespunzătoare măsurii în care se iau în considerare particularități mai de amănunt ale distribuției cîmpului gravitațional terestru.

Considerînd dintr-o perspectivă mai îndepărtată istorică problema formei Pămîntului, vom constata că, după ce s-a recunoscut izolarea în spațiu a planetei noastre, pentru reprezentarea formei ei generale s-au folosit succesiv — în acord cu date de observație tot mai numeroase, mai variate şi (în etapele mai recente) cu un conținut fizic tot mai bogat — sfera, elipsoidul de rotație turtit, sferoidul şi geoidul. Primele două sînt forme care, legate prin dimensiuni de corpul real pe care urmează să-l reprezinte ideal, pot fi definite în cadru pur geometric prin condițiile, exprimabile şi analitic, ce trebuie satisfăcute de punctele suprafeței lor. Depăşite de mult, ca reprezentînd aproximații prea depărtate de realitate, ele ies din sfera de interes a prezentării noastre, care pune accentul pe descifrarea actuală a mesajului de care se ocupă. Celelalte două forme ne vor reține, însă, atenția prin satisfacerea condiției de a reprezenta aproximații mai bune ale formei Pămîntului, rezultate din descifrarea pe plan geofizic-geodezic a distribuției cîmpului gravității. Pe lîngă aceasta, ele satisfac şi condiția de a fi legate de actualitate prin pregătirea, respectiv prin reprezentarea fazei prezente a imaginii generale, idealizate, a formei planetei noastre.

Față de un elipsoid de rotație care se potriveşte cît mai bine dimensiunilor şi turtirii Pămîntului real şi îşi menține totodată proprietățile geometrice ce-l definesc, sferoidul terestru se caracterizează prin faptul că, tangent la acest elipsoid atît la poli cît şi la ecuator, el se ridică cu cîțiva metri deasupra lui în porțiunile intermediare, ridicarea maximă (de circa 17 metri) avînd loc la latitudinea de 45°. Deşi reprezentabil matematic printr-o ecuație de gradul 14 — elipsoidul avînd, evident, ca echivalent analitic o ecuație de gradul 2 —, sferoidul rămîne încă o suprafață relativ simplă, destul de netedă dar constituind un suport mai bine adaptat realității pe care să se

sprijine imaginea suprafeței reale a Pămîntului, în toată complexitatea ei.

Spre deosebire de sferoid, geoidul nu poate fi exprimat analitic. El reprezintă o idealizare mai puțin simplificatoare a suprafeței fizice a Globului, obținută prin dubla condiție, în aparență geometrică dar de fapt cu conținut preponderent fizic, ca în fiecare punct el să aibă nivelul mării şi fiecare element al suprafeței lui să fie ortogonal față de direcția gravității în punctul corespunzător. Asimilat prin aceasta cu o suprafață de nivel a cîmpului gravității, geoidul ar fi reprezentat de forma pe care ar lua-o suprafața liberă a mării liniştite care ar acoperi întreg Pămîntul, cu menținerea distribuției actuale a cîmpului gravității. Elementul fizic determinant pentru geoid este reprezentat de faptul că direcția gravității este impusă de distribuția de mase din interiorul Pămîntului, cele mai apropiate de punctul considerat avînd, bineînțeles, influența covîrşitoare.

Față de normala pe sferoid, aşa-numita „verticală geodezică" (nu foarte diferită de normala pe elipsoidul de referință, nici în punctele de maximă abatere a sferoidului în raport cu acesta), direcția gravității, reprezentînd „verticala fizică", se poate abate în puncte față de care distribuția de mase terestre prezintă asimetrii, cu un unghi numit deviație a verticalei. Deviația verticalei poate fi cauzată de asimetrii vizibile ale reliefului sau de neregularități ascunse ale constituției subsolului. Astfel, în apropierea unui masiv muntos verticala este deviată înspre acesta, datorită atracției maselor lui, a căror acțiune nu este compensată de intervenția unei atracții corespunzătoare în sensul opus. Pe de altă parte, într-o zonă de cîmpie se poate produce o deviație a verticalei dacă există eterogenități în structura subsolului: o ridicare a fundamentului cristalin mai dens determină o abatere a verticalei în direcția ei, pe cînd prezența unui dom de sare, de densitate mai mică decît a formațiunilor geologice adiacente, are ca efect o deviație a verticalei în sens opus: un exces de masă (primul caz) „atrage" verticala, iar un deficit (cazul al doilea) o „respinge".

Ținînd seama, pe de o parte, de condiția de definire a geoidului prin perpendicularitatea fiecărei mici porțiuni din suprafața lui pe direcția verticalei fizice în punctul în jurul căruia se consideră suprafața elementară şi, pe de alta, de cele două categorii de cauze ale deviațiilor verticalei, putem ajunge la o primă apreciere a gradului de complicație a suprafeței definite ca geoid. Mai simplu decît suprafața fizică a Pămîntului în zonele muntoase, unde el reprezintă ondulații care reproduc, în trăsături mari, variațiile reliefului (mult atenuate, însă, ca amplitudine şi fără asperitățile tuturor accidentelor acestuia), dar de aspect, evident, mai complicat decît suprafața plană din zonele de cîmpie, cu structuri complicate în subsol, unde suprafața îi este ondulată din cauza acestora, geoidul este, totuşi, o suprafață de o mare complexitate. Forma lui reflectă simultan, suprapuse, elementele geometrico-topografice ale reliefului şi elementele fizico-geologice ale structurii subsolului.

Determinarea formei geoidului este o problemă de determinare, punct cu punct,

a unei suprafețe neregulate, relativ uşor de definit fizic dar fără un echivalent analitic simplu. Ea se poate face şi pe baze astronomico-geodezice, prin aşa-numitul nivelment astronomic. Acesta reprezintă o operație analogă cu nivelmentul geometric, elementul fizic intervenind aici doar mascat, legat de orizontalizarea aparatelor (ceea ce înseamnă raportarea orientării lor la verticala fizică) în diferitele stațiuni ale traseului de-a lungul căruia se determină, din aproape în aproape, deviațiile verticalei. Importantă este, însă, în contextul mesajelor fizice ale Pămîntului — ca avînd o semnificație deosebită — metoda de determinare a geoidului fundamentată pe măsurători gravimetrice. Ea utilizează distribuția valorilor gravității pe întregul Glob pentru a obține, prin intermediul unei celebre formule stabilite de Stokes la mijlocul secolului trecut, informații privitoare la geoid într-un singur punct. Se înțelege ce bogăție de date gravimetrice, reprezentată de variațiile gravității pînă la antipodul punctului considerat, este implicată în această operație. Pe cînd în cazul nivelmentului astronomic imaginea ondulațiilor geoidului rezultă indirect din variația deviațiilor verticalei de-a lungul unor profile, în cazul determinării gravimetrice cu ajutorul formulei lui Stokes ea este furnizată în forma direct intuitivă a deviațiilor nivelului, adică a coborîrii sau ridicării geoidului în raport cu sferoidul în punctele considerate. Acestea pot avea o distribuție în suprafață, cu o densitate corespunzătoare necesităților de definire mai mult sau mai puțin detaliată a geoidului, în acord cu gradul de complexitate a lui în zona respectivă.

Se înțelege astfel, din însuşi modul de determinare, că geoidul reprezintă o completare prin detaliere a imaginii generale conturate de sferoidul terestru. Caracterizată la scară planetară prin turtirea elipsoidului de referință, identică cu aceea a sferoidului, şi regional-local prin ondulațiile geoidului, forma Pămîntului stabilită gravimetric constituie, în cadrul schițat în capitolul anterior, un important mesaj al Pămîntului, din a cărui descifrare este de aşteptat să rezulte informații privitoare la distribuția generală a maselor terestre în interiorul Globului, la starea lor de echilibru şi la structura părților lor apropiate de suprafață. Trebuie să precizăm, însă, că, deşi în principiu aşa este, de fapt descifrarea mesajului gravimetric al formei Pămîntului se face numai pentru prima categorie de informații. În celelalte două direcții, valorificarea datelor gravimetrice, culese sub forma de variații ale gravității la suprafața Pămîntului, se efectuează mai nemijlocit, supunîndu-se descifrării mesajul reprezentat de hărți gravimetrice care reprezintă distribuția geografică a valorilor acestei mărimi, după un tratament adecvat scopului urmărit.

Principala mărime care caracterizează forma Pămîntului la scară planetară este turtirea sferoidului — de fapt a elipsoidului de referință care serveşte pentru a-l defini —, suprafață în raport cu care se face reperarea deviațiilor nivelului, adică la care se raportează ondulațiile geoidului. Atît în legătură cu valoarea turtirii Pămîntului cît şi privitor la ondulațiile cu caracter regional ale geoidului sînt de semnalat în ultimul deceniu contribuții importante, aduse de cercetările efectuate asupra datelor furnizate de rachete şi de sateliții artificiali ai Pămîntului. Este vorba de utilizarea, în scopul

cunoaşterii cît mai precise a valorii turtirii precum şi pentru completarea imaginii ondulațiilor geoidului pentru regiuni cît mai întinse ale Globului — îndeosebi în zone de accesibilitate redusă — a informațiilor care rezultă din studiul traiectoriilor reale ale sateliților artificiali.

Precalculată teoretic, pe baza datelor inițiale — condiții de lansare şi distribuția, cunoscută în linii mari, a cîmpului gravitațional în spațiul viitorului său traseu —, traiectoria unui satelit artificial al Pămîntului este în realitate diferită. Traiectoria prezintă abateri de la cea teoretică tocmai datorită deosebirilor dintre distribuția admisă pentru cîmpul gravitațional terestru şi cea pe care acesta o prezintă în realitate, care nefiind cunoscută în toate detaliile ei n-a putut fi luată în considerare în calculele inițiale.

Plecînd de la imaginea sugestivă a lui Perpessicius, proiectată în viitor dar corespunzînd şi situației actuale:

„... rachetele şi sateliții artificiali
Vor continua să-nfăşoare cu traiectoriile lor
Pămîntul cu sacre bandaje, ca pe-o mumie",

vom face constatarea că traiectoriile reale pun în evidență, cu fidelitate, particularități ale formei Pămîntului în reprezentarea geoidului — corespunzătoare variațiilor cîmpului gravitațional terestru —, aşa cum bandajele, mulîndu-se pe mumie, lasă să i se vadă formele. Imaginea poate fi exploatată şi mai mult, remarcîndu-se că prin comparația făcută se poate sugera şi atenuarea, la nivelul traiectoriilor sateliților artificiali, a ondulațiilor prea locale ale geoidului, netezirea structurii fine corespunzătoare acestora şi scoaterea în evidență a caracteristicilor lui regionale. Implicit, din particularitățile mişcării reale a sateliților rezultă şi informații asupra turtirii terestre.

Cunoscută astăzi cu o foarte bună precizie, pe baza datelor mutual concordante ale măsurătorilor gravimetrice terestre şi ale determinărilor cu ajutorul sateliților artificiali, turtirea Pămîntului a fost descifrată în privința conținutului ei fizic şi a condus la informații valoroase. Satisfăcînd aşteptările, această descifrare a deschis în acelaşi timp şi perspective nebănuite în direcția cunoaşterii unor condiții din interiorul Globului care depăşesc simpla distribuție, la un moment dat, a maselor terestre pentru a sugera posibilități de adaptare la evoluția în timp a rotației Pămîntului, ceea ce este de o importanță excepțională din punct de vedere geodinamic.

Se ştie că acțiunea atractivă a Lunii şi Soarelui asupra Pămîntului se manifestă, datorită abaterii acestuia de la forma sferică, nu numai printr-o forță exercitată asupra centrului de masă, ci şi printr-un cuplu aplicat „umflăturii" lui ecuatoriale şi avînd ca efect precesia echinocțiilor; evident, cupluri egale şi opuse sînt exercitate şi de Pămînt asupra Lunii şi Soarelui, efectul asupra Lunii fiind apreciabil. În mod analog, şi

Pămîntul turtit exercită, prin umflătura ecuatorială, un cuplu asupra sateliților artificiali, ale căror mase sînt prea mici, însă, pentru a influența sensibil mişcarea Pămîntului. Sub acțiunea acestui cuplu, orbitele sateliților artificiali iau forme care reprezintă cele mai evidente dovezi ale abaterii planetei noastre de la forma sferică şi oferă, implicit, posibilitatea determinării cantitative a acestei abateri, cu alte cuvinte a măsurii ei care este turtirea.

Această mărime, care în principiu poate fi definită în termeni pur geometrici, legați de dimensiunile Pămîntului, are de fapt un conținut fizic cu semnificație de mesaj al Pămîntului: ea este legată atît de distribuția de mase cît şi de rotația terestră. Întrucît date precise asupra ultimului fenomen ne sînt puse la dispoziție de către astronomie, iar informații asupra distribuției de mase ne furnizează distribuția cîmpului gravitațional la suprafața Pămîntului, rezultă că legătura menționată — exprimată cantitativ de o teoremă fundamentală a geodeziei gravimetrice, dedusă acum două secole şi jumătate de Clairaut — poate conduce la indicații asupra turtirii terestre, stabilită, în ultimă instanță, pe baze gravimetrice. De fapt valoarea „gravimetrică" a turtirii Pămîntului este adoptată în prezent pentru această mărime ca fiind mai precisă şi tocmai modalitatea stabilirii ei este cea care îi sugerează utilizarea ca mesaj fizic al Pămîntului.

După o descifrare adecvată, în cadrul conceptual actual privitor la dinamica terestră şi la constituția fizică a interiorului Globului, se poate ajunge la o mai bună cunoaştere a distribuției generale a maselor care alcătuiesc planeta noastră. Mai mult decît atît: în ultimul timp s-a arătat că descifrarea mesajului fizico-geometric reprezentat de valoarea numerică a turtirii sferoidului terestru furnizată de datele gravimetrice poate conduce şi la informații privind proprietățile fizice ale interiorului Globului care caracterizează posibilitățile de adaptare a distribuției maselor ce-l compun la condiții dinamice în evoluție.

Acesta ar fi cazul Pămîntului, a cărui rotație este încetinită, extrem de lent dar continuu: lungimea zilei scade dar cu cantități atît de mici că din însumarea lor abia rezultă la o sută de mii de ani o micşorare a duratei zilei cu una pînă la două secunde. De aici urmează că, pentru menținerea permanentă a echilibrului, Pămîntul trebuie să-şi ajusteze continuu distribuția de mase, deci şi forma generală, la solicitări din ce în ce mai reduse din partea forțelor centrifuge generate de rotația mereu încetinită. Se întrevede, astfel, că este posibil ca din descifrarea mesajului privitor la forma Pămîntului să rezulte şi indicații asupra proprietăților fizice determinante pentru această ajustare-adaptare, caracterizată global prin viscozitatea maselor din interiorul Globului.

Contribuția gravimetriei în această problemă are o semnificație deosebită şi merită să fie examinată ceva mai de aproape, atît pentru că ea ilustrează o posibilitate interesantă de descifrare a unui mesaj foarte compact al Pămîntului — mesaj care, la

prima vedere, nu ar părea să aibă un conținut prea bogat în informații de ordin fizic — , cît şi pentru valoarea intrinsecă a datelor astfel obținute cu privire la proprietățile fizice ale interiorului inaccesibil direct al planetei noastre. De altfel, tocmai în acest context se manifestă în modul cel mai pregnant şi caracterul de actualitate al descifrărilor respective, cele mai recente în domeniul datelor gravimetrice şi cu rezultate de o natură neaşteptată, ce-i drept pentru moment de un grad relativ redus de certitudine, datorită cadrului conceptual al descifrării, care conține şi unele elemente ipotetice.

Cea mai importantă particularitate a turtirii gravimetrice a Pămîntului este că valoarea ei numerică (1/298,25), bine stabilită atît din determinări terestre cît şi din studiul sateliților artificiali, este diferită de aceea calculată pentru un Pămînt ideal, în echilibru hidrostatic în condițiile de solicitare puse în evidență astronomic, prin precesia echinocțiilor, valoare să-i zicem „astronomică" a turtirii (1/300). În prealabil se pun două întrebări în legătură cu această diferență dintre cele două valori numerice, cea gravimetrică reală şi cea astronomică teoretică: (1) Această diferență, atît de mică (circa 0,5%), este ea reală? şi (2) Are ea o semnificație specială aşa ca, indicată — cum este — de o comparație avînd un termen rezultat din măsurători gravimetrice, să i se atribuie un alt substrat fizic decît celorlalte anomalii gravimetrice?

Răspunsul la prima întrebare este categoric pozitiv. Toată lumea de specialitate este de acord că, deşi mică, diferența se ridică deasupra erorilor de determinare a celor două valori între care ea apare. Nu mai este cazul, însă, în privința răspunsului la cea de-a doua întrebare. Aceasta conduce la două descifrări diferite ale mesajului turtirii Pămîntului, corespunzătoare celor două modalități de a considera diferența dintre valorile ei numerice obținute gravimetric şi astronomic: ca avînd o semnificație deosebită, legată în primul rînd de dinamica Pămîntului, sau ca încadrîndu-se între anomaliile gravimetrice planetare-continentale, legate primordial de distribuția maselor terestre.

În cadrul primei concepții, se admite că turtirea reală de azi corespunde condițiilor dinamice din „timpurile geologice", cînd Pămîntul se rotea mai repede. Încetinirea rotirii Pămîntului ar implica o reducere a turtirii, ceea ce ar avea, însă, loc cu o întîrziere corespunzătoare viscozității maselor din interiorul Globului, a căror adaptare la condițiile dinamice variabile nu se poate face prompt. Reajustarea turtirii Pămîntului la noua viteză de rotație s-ar face cu o întîrziere pentru care s-a estimat o valoare de ordinul a zece milioane de ani. Turtirea constatată astăzi prin măsurătorile gravimetrice şi cu ajutorul sateliților artificiali ai Pămîntului ar fi, aşadar, cea corespunzătoare condițiilor geodinamice din Pliocen.

Valoarea mare a întîrzierii cu care forma generală a Pămîntului, caracterizată de turtire, se adaptează variației de viteză a rotației terestre implică o viscozitate enormă a materiei din mantaua Pămîntului — căci nucleul, cu proprietăți de fluid, nu ar

interveni în acest proces —, mult mai mare decît tot ce se cunoaşte la suprafața Pămîntului, de ordinul a 10^{26} poise; pentru a ne face o idee despre viscozitatea astfel indicată, să ne gîndim că viscozitatea apei este de o sutime din unitatea de viscozitate dinamică reprezentată de 1 poise. Valoarea foarte mare astfel rezultată pentru viscozitatea interiorului Globului trebuie să fie reprezentativă pentru ansamblul mantalei terestre şi exclude atît posibilitatea existenței unor zone de dimensiuni mari în care să se poată produce curenții de convecție postulați pe baze geotermice şi geotectonice cît şi o variație apreciabilă a orientării axei de rotație a Pămîntului, pe care o sugerează unele considerente paleoclimatice şi pe care o susține şi paleomagnetismul.

Cea de-a doua concepție privitoare la interpretarea discrepanței constatate pentru valoarea turtirii reale a Pămîntului față de cea teoretică admite că ar fi vorba numai de o manifestare a distribuției de mase care prin ordinul ei de mărime se situează printre celelalte anomalii prezentate de cîmpul gravitațional terestru ca efecte ale acestei distribuții de mase. Abaterea de la echilibrul hidrostatic pe care o pune în evidență diferența dintre turtirea gravimetrică şi cea astronomică n-ar fi, în această concepție, mai semnificativă decît celelalte abateri de la echilibrul hidrostatic manifestate, prin intermediul anomaliilor gravimetrice planetare-continentale, de repartiția maselor din interiorul Globului. Ca atare, interpretarea ei pe baze diferite de cele adoptate pentru ansamblul acestor anomalii gravimetrice n-ar fi justificată.

Desigur trebuie admis ca Pămîntul se comportă, în ansamblu, ca un corp cu o viscozitate ridicată dar nu se poate ignora condiția impusă de considerente mecanice că rotația lui trebuie să se facă în jurul unei axe astfel orientate încît momentul de inerție al Pămîntului față de ea să fie maxim. Adaptarea Pămîntului la condițiile dinamice în evoluție — şi această evoluție este marcată nu numai de încetinirea rotației ci şi de deriva continentelor — s-ar manifesta, astfel, în primul rînd, în reorientări ale axei de rotație, deci în migrări ale polilor la suprafața Pămîntului.

În cadrul acestei concepții, nu mai este necesar să se apeleze la constanta de timp rezultată din micşorarea vitezei de rotație a Pămîntului. În locul intervalului de timp de circa zece milioane de ani, care ar asigura reajustarea turtirii terestre la rotația încetinită şi care indică valori colosale ale viscozității interiorului Globului, se utilizează o constantă de timp dedusă din migrația polilor geografici. Dacă aceştia sînt asociați — cum se pare — cu cei geomagnetici, pentru care datele paleomagnetice arată deplasări de ordinul a zece kilometri într-un milion de ani, nu mai trebuie invocată decît o viscozitate cu două ordine de mărime mai mică decît cea rezultată în cadrul primei concepții. Încă foarte mare, această valoare a viscozității este în acord ceva mai bun decît cealaltă cu ordinul de mărime pe care-l indică reajustările izostatice, despre care vom vorbi imediat, în legătură cu descifrarea mesajelor gravitaționale ale Pămîntului privitoare la echilibrul maselor terestre. De asemenea, concepția care aliniază variația turtirii gravimetrice terestre printre celelalte anomalii

gravimetrice planetare-continentale, fără a-i acorda o semnificaţie specială, nu exclude — ca cealaltă — posibilitatea existenţei unor curenţi de convecţie în zonele adînci ale mantalei Pămîntului. În schimb, lanţul pe care ea-l reprezintă nu este mai solid decît cea mai slabă verigă a lui: informaţia de origine paleomagnetică a migraţiei polilor tereştri, despre ale cărei slăbiciuni va fi vorba în capitolul următor.

Descifrarea mesajului fizic al Pămîntului pe care-l reprezintă anomaliile gravimetrice planetare-continentale, destul de bine conturate astăzi atît de măsurătorile gravimetrice propriu-zise cît şi de informaţiile rezultate din studiul traiectoriilor reale ale sateliţilor artificiali, în special pentru cazul celor „geodezici", lansaţi anume în astfel de scopuri, a furnizat şi ea date importante asupra interiorului Globului terestru. Important este că, independent de concepţia în care se face această descifrare — cea care acordă diferenţei dintre turtirea gravimetrică şi cea astronomică privilegiul unei semnificaţii speciale şi, deci, impune ca suprafaţă de referinţă pentru anomaliile gravimetrice elipsoidul cu turtirea 1/298,25 sau cea care îi contestă acest privilegiu, obligînd să se facă referirea anomaliilor la elipsoidul cu turtirea de 1/300 —, particularităţile cîmpului gravităţii constituite de anomaliile lui planetare-continentale nu prezintă nici o corelaţie cu distribuţia uscatului şi oceanelor pe Glob. (Din acest punct de vedere, termenul de „continental", utilizat în asociaţie cu cel de „planetar" pentru a le desemna este lipsit de sensul de referire la o masă terestră exondată şi nu vrea să spună mai mult decît să sugereze extinderi în suprafaţă ale anomaliilor, comparabile cu dimensiunile continentelor.)

Absenţa de corelaţie dintre ondulaţiile largi ale geoidului, respectiv dintre anomaliile gravimetrice de mari extinderi geografice — cu imagini şi repartiţii la suprafaţa Globului aproape identice în cazul celor două concepţii amintite — şi distribuţia continentelor şi oceanelor indică, cu toată claritatea, un fapt: anomaliile de densitate care dau naştere acestor anomalii n-au nimic a face cu continentele sau cu marile bazine oceanice. Ele nu sînt asociate cu distribuţia de mase crustale ale cărei neregularităţi sînt puse în evidenţă de ridicările şi coborîrile acestora în raport cu nivelul mării, ci trebuie să-şi aibă originea mai adînc, în interiorul mantalei Pămîntului.

Mai putem anticipa aici că aceeaşi absenţă de corelaţie dintre anomaliile menţionate şi repartiţia maselor terestre vizibile constituie o dovadă suplimentară în favoarea constatării, făcute iniţial pe alte baze, a satisfacerii generale a condiţiilor de echilibru izostatic — despre care urmează să vorbim mai încolo — pentru ansamblul Globului terestru. Tot în cadrul descifrării mesajului reprezentat de anomaliile planetare-continentale ale cîmpului gravităţii, se mai obţine o indicaţie asupra substratului lor fizic şi asupra interiorului planetei noastre, rezultată ce-i drept şi pe baza luării în considerare a unor date seismologice. Se ştie, anume, că la trecerea de la manta la nucleu densitatea prezintă o creştere de la circa 6 g/cm^3 la circa 10 g/cm^3 şi aceasta într-o zonă căreia datele seismologice îi atribuie o grosime redusă, de ordinul a

5 kilometri. S-ar putea, astfel, ca tocmai în acest strat subțire de tranziție dintre manta şi nucleu să se situeze anomaliile de densitate responsabile de producerea anomaliilor gravimetrice de mare extindere constatate la suprafața Pămîntului. De altfel, şi rapiditatea cu care amplitudinea acestor anomalii descreşte cu altitudinea — indicată tot de rachete şi de sateliții artificiali ai Pămîntului — sugerează surse adînci pentru ele.

Încheind aici expunerea privitoare la mesajul pe care-l reprezintă forma Pămîntului determinată gravimetric şi la descifrările actuale ale lui, mai putem aminti că o completare interesantă a fost adusă în acest domeniu de o informație, furnizată şi ea de particularitățile traiectoriilor reale ale sateliților artificiali, în legătură cu aspectul general al geoidului. Aceste traiectorii au arătat că suprafața de nivel de altitudine zero (corespunzătoare, deci, nivelului mării), cu care este asimilat geoidul, prezintă o depresiune inelară în emisfera boreală, la latitudini mijlocii, întinzîndu-se în sensul paralelelor geografice, şi o ridicare corespunzătoare în emisfera australă. De valori relative foarte mici (de ordinul a 40 sau 50 de metri, față de cei peste şase mii de kilometri ai razei terestre), denivelările „geoidului satelitic” în raport cu sferoidul terestru ar face ca suprafața simplificată a Pămîntului astfel reprezentată să poată fi comparată — cum s-a şi făcut — cu forma pe care o are o pară, cu partea mai „umflată” în emisfera sudică. Desigur, o astfel de particularitate a formei generale a planetei noastre — pentru care s-a propus numele de terroid sau telluroid — constituie o manifestare a distribuției de mase din interiorul Globului şi, în consecință, descifrarea mesajului pe care-l reprezintă, operație în curs de efectuare, este susceptibilă de contribuții noi în legătură cu problema atît de veche a formei Pămîntului.

●

Un fenomen cu totul deosebit de cele considerate pînă acum, amintit doar în treacăt mai înainte, este constituit de aşa-numitele maree terestre. Reprezentînd o altă manifestare terestră a atracției universale, acest fenomen îşi are cauzele situate în afara Globului dar o desfăşurare la care participă ca erou principal Pămîntul; caracterul de purtător de mesaje din partea planetei noastre, pe care-l au mareele terestre, este, astfel, evident.

Deşi în realitate fenomenul prezintă mari complicații, care-şi au ecoul şi în simbolismul matematic al teoriilor elaborate pentru descrierea cantitativă a desfăşurării lui ca şi a mecanismului de producere, conturarea lui se poate face, în principiu, relativ simplu. Atracția gravitațională exercitată de Lună şi de Soare asupra maselor terestre produce deformări elastice periodice ale Pămîntului „solid”, cu totul analoage acelora ale oceanelor, cunoscute în general sub numele de flux şi reflux. Evoluția lor în timp şi lungimea perioadelor care intervin pentru a o caracteriza corespund deplasărilor relative ale celor trei corpuri, amplitudinea deformării, la un

moment dat şi într-un loc dat, fiind determinată de poziția mutuală în spațiu a Pămîntului, Lunii şi Soarelui ca şi de poziția pe Glob a punctului considerat. De un ordin de mărime sensibil mai redus decît al celor oceanice, mareele terestre se manifestă atît în schimbări ale formei Pămîntului, prin variații ale nivelului şi ale înclinării suprafeței lui, cît şi în variații ale gravității. Şi unele şi altele din aceste manifestări sînt înregistrate şi evaluate cantitativ şi descifrarea mesajului pe care ele îl reprezintă poate furniza informații asupra rigidității planetei noastre, în ansamblu, aşa cum rezultă din comportarea ei față de solicitările extraterestre variabile în timp, cărora le este supusă.

Pe această cale s-au obținut deja date interesante dar ele reprezintă relativ puțin în raport cu ceea ce este de aşteptat. Mai sînt necesare atît completări ale materialului de observație cît şi dezvoltări teoretice, care să asigure contribuții într-adevăr semnificative ale acestui domeniu la cunoaşterea unor aspecte importante ale dinamicii Pămîntului. În particular trebuie dezvoltat cadrul teoretic prin luarea în considerare a contribuției complexului reprezentat de masele continentale şi oceanice, la suprafață, şi de întregul ansamblu al părților mai adînci la producerea unui fenomen cumulativ, cu manifestări globale complicate ca morfologie precum şi ca substrat fizic.

În continuarea a ceea ce s-a făcut pînă acum, descifrarea mesajului corespunzător trebuie să conducă la indicații mai precise cu privire la variația în timp a rotației Pămîntului, afectată de mareele terestre şi oceanice, care acționează ca o frînă. Se înțelege că, deocamdată, cantitatea de date de observație de care dispunem este prea redusă față de complexitatea fenomenului. Nu este vorba numai de cantitatea propriu-zisă ci şi de distribuția geografică a locurilor în care materialul faptic a fost cules ca şi de intervalul de timp la care el se referă, mult prea scurt în raport cu ordinul de mărime al timpului în care desfăşurarea fenomenului poate duce la efecte observabile. Totuşi, chiar de pe acum, indicațiile semicantitative care rezultă sînt concordante ca ordin de mărime cu cele, statistic semnificative, furnizate de „ceasornicele fosile” reprezentate de resturile unor organisme marine de altădată — un altădată geologic — care prin compoziția izotopică a părților lor solide, păstrate pînă astăzi, pun în evidență intervale diurne, lunare şi anuale corespunzătoare condițiilor din timpul vieții ființelor respective, indicînd, cu un grad rezonabil de certitudine, valori mai mari decît cele actuale.

●

Considerate la scară continentală-regională, particularitățile cîmpului gravității care se manifestă ca anomalii gravimetrice sau ca deviații ale verticalei prezintă anumite regularități în raport cu caracterele generale ale regiunii în care apar: zonă continentală sau oceanică, altitudine medie, tip de relief etc. Ținînd seama de faptul că aceste particularități indică abateri ale distribuției reale a cîmpului gravific — ca

intensitate, respectiv ca orientare — de la distribuția ideală a cîmpului normal, corespunzător stării de echilibru a Pămîntului în imaginea sferoidului terestru, se înțelege că ele pot furniza informații asupra condițiilor de echilibru în care se găsesc efectiv masele terestre, în particular cele din porțiunile Globului mai apropiate de suprafață, în zona respectivă.

Deşi nu constituie propriu-zis anomalii gravimetrice, în sensul obişnuit al expresiei, deviațiile verticalei scot, totuşi, în relief un anumit aspect al lor. Lucrul este clar pus în evidență atît de caracterul lor de măsură a abaterii orientării reale a gravității de la direcția pe care ar avea-o această mărime în cazul Pămîntului normal, idealizat de sferoid, cît şi de strînsa lor legătură cu deviațiile nivelului, adică cu ondulațiile geoidului. De altfel, dacă anomaliile gravimetrice propriu-zise reprezintă particularități în sensul abaterii de la „normal" ale intensității cîmpului gravific, deviațiile verticalei constituie autentice anomalii ale direcției lui. De aceea, considerarea deviațiilor verticalei apare cu totul naturală în legătură cu problema echilibrului maselor terestre, în special cînd este vorba de masele crustale, cu acelaşi titlu ca şi considerarea anomaliilor gravității.

Deşi ar fi interesant să examinăm problema echilibrului maselor crustale în perspectiva ei istorică, cu diversele etape ale dezvoltării ei, ne vom limita să indicăm aici numai fundamentarea ei faptică şi cadrul conceptual utilizat azi pentru interpretarea datelor de observație. Cu alte cuvinte, vom contura forma mesajului pe care-l primim din partea Pămîntului în această privință şi modalitatea descifrării lui actuale, indicațiile de ordin istoric fiind sporadice şi limitate la cele cu oarecare semnificație pentru situația de astăzi.

Mai întîi să remarcăm că, în ciuda marilor diferențe de altitudine pe care le prezintă uneori chiar pentru puncte nu prea depărtate geografic, crusta terestră este, în general, în echilibru. Chiar în zonele cu manifestări de instabilitate, ca cele reprezentate de erupțiile vulcanice sau cutremurele de pămînt, deranjările vizibile de echilibru se produc sporadic şi pentru durate limitate. Starea aceasta de echilibru general — echilibru care nu este hidrostatic, date fiind diferențele de altitudine —, în care par a se găsi de regulă masele crustale, a fost desemnată prin termenul de izostazie, amintit deja sub forma adjectivului corespunzător, în două contexte anterioare. De altfel, cuvîntul „izostazie" a fost destinat inițial să indice ceva cu mult mai general, anume „condiția de echilibru spre care tinde un corp planetar, omogen sau neomogen" (Dutton, creatorul cuvîntului).

Informații mai precise în legătură cu echilibrul izostatic decît simplele sugestii ale constatărilor făcute pentru zone de mari neregularități ale reliefului precum şi indicații asupra modalității de realizare a acestui echilibru rezultă tocmai din particularitățile continentale-regionale deja amintite, ale cîmpului gravific, manifestate în deviațiile verticalei şi în anomaliile gravimetrice. În privința deviației verticalei este bine să

reamintim aici că ea reprezintă unghiul dintre normala pe geoid (verticala fizică sau astronomică, materializată pe direcția firului cu plumb) şi normala pe sferoidul terestru, respectiv pe elipsoidul de referință cu care acesta este adus la tangență în regiunea considerată (verticala geometrică sau geodezică). Considerînd numai cazul neregularităților vizibile ale distribuției de mase terestre care pot produce deviații ale verticalei, mai reamintim că, în apropierea unui masiv muntos, este de aşteptat ca verticala să fie deviată către acesta, cu un unghi determinat de forma şi de dimensiunile ca şi de densitatea masivului precum şi de distanța pînă la el a punctului considerat. Pe de altă parte, în legătură cu anomaliile gravimetrice este necesar să completăm cele spuse mai înainte cu precizarea că ele au, într-o bună măsură, un caracter convențional şi pot avea semnificații diferite, după felul în care s-a făcut reducerea datelor de observație şi după modelul adoptat ca termen de comparație pentru cîmpul măsurat.

Dacă din valorile măsurate ale gravității se elimină numai partea corespunzătoare variațiilor de altitudine, fără luarea în considerare a influenței reliefului şi a „stratului intermediar” de rocă dintre punctul de măsurare şi nivelul de referință, în raport cu care se ia altitudinea şi la care se „reduc” toate valorile în vederea comparării lor, se obține, prin compararea cu valoarea normală în punctul respectiv, o anomalie numită „anomalie în aer liber”. Fără a fi chiar corect, termenul este justificat de faptul că influența altitudinii se elimină ca şi cînd între punctul de măsurare şi cel de reducere (adeseori, dar nu totdeauna, la nivelul mării) n-ar fi rocă ci „aer liber”. Dacă, dimpotrivă, se ține seama şi de efectul neregularităților reliefului şi de acela al stratului intermediar, după luarea în considerare a influenței altitudinii, anomalia la care conduce compararea valorii, astfel reduse, cu valoarea cîmpului normal va fi, evident, diferită de cea în aer liber. Această anomalie gravimetrică, numită anomalie Bouguer, are o evidentă semnificație geologică, legată de structura subsolului de sub nivelul de referință adoptat, căci efectele provocate de ceea ce se găseşte deasupra lui au fost în prealabil înlăturate prin reduceri. În schimb, anomalia în aer liber, de semnificație preponderent geodezică, arată abaterea valorii măsurate a gravității de la cîmpul normal, după ce valoarea a fost adusă în stare de comparabilitate, din punctul de vedere al nivelului, cu celelalte valori din alte puncte ale regiunii, reduse şi ele la acelaşi nivel, menținîndu-se însă în aceste valori toate celelalte influențe, afară de aceea a altitudinii, considerată pur geometric.

Iată acum principalele date de observație furnizate de gravimetrie în legătură cu echilibrul maselor terestre crustale, date care constituie importante mesaje ale Pămîntului în această direcție şi din a căror descifrare sînt de aşteptat informații asupra mecanismului fizic de realizare a echilibrului izostatic. Sînt, în esență, două categorii de fapte: unele în legătură cu deviația verticalei, altele privind anomaliile gravității.

De mult se constatase că deviația verticalei măsurată efectiv în apropierea unui

munte este mai mică decît cea calculată pe baza caracteristicilor lui (volum, densitate, formă şi aşezare față de locul avut în vedere) cu ajutorul legii lui Newton. Bouguer, care a făcut această observație pe la mijlocul secolului al XVIII-lea în Peru, în vecinătatea muntelui Chimborazo care prin forma lui geometrică aproape regulată permitea o evaluare relativ uşoară şi cu şanse de a fi şi precisă a valorii „teoretice" a deviației verticalei, a încercat să explice faptul considerînd că muntele prezintă goluri în interior, care n-au fost luate în seamă la efectuarea calculelor. Problema influenței masivelor muntoase asupra verticalei a reapărut, după circa un secol, cu ocazia triangulației de mare precizie a Indiei, cu acelaşi rezultat că valorile observate pentru această mărime sînt mai mici în apropierea masivului Himalaya (circa 5") decît cele calculate în ipoteza că efectul s-ar datora exclusiv părții vizibile a masivului (aproximativ 15"). De atunci, numeroase determinări de acest fel au fost făcute în diferite locuri, cu precizie tot mai mare şi cu acelaşi rezultat general: apare în toată claritatea că, în toate cazurile, valorile deviației verticalei furnizate de observații sînt sistematic mai mici decît valorile calculate pe baza atracției neregularităților reliefului, care par a le provoca.

Acest rezultat reprezintă un important fapt de observație cantitativă, independent de orice ipoteză. El sugerează că atracția părților vizibile ale maselor topografice este parțial „neutralizată" de distribuția de mase din subsol: totul se petrece ca şi cînd sub masivele muntoase, care reprezintă la suprafață excese vizibile de masă, ar exista deficite invizibile de masă, cu efect de compensare parțială a influențelor celor dintîi.

În ceea ce priveşte anomaliile gravimetrice, lucrurile importante, din punctul de vedere care ne interesează acum, sînt următoarele. Anomaliile în aer liber, puse în evidență prin compararea valorii gravității observate şi reduse la nivelul mării, cu valoarea gravității normale, nu sînt in general prea mari, aşa cum ar fi de aşteptat judecînd după excesele şi deficitele vizibile de masă. Mai mult chiar: ele au acelaşi ordin de mărime în regiunile continentale şi oceanice nu prea accidentate — fără munți, respectiv fără insule — si, în orice caz, semnul lor nu corespunde sistematic neregularităților evidente de distribuție a maselor crustei terestre (este vorba de semnul pozitiv sau negativ al diferenței dintre valoarea în aer liber şi valoarea normală a ei).

Pe de altă parte, anomaliile Bouguer, rezultînd — cum am spus — din compararea valorii Bouguer a gravității, care nu mai cuprinde nici influența stratului intermediar de roci pînă la nivelul de reducere şi nici pe a neregularităților geomorfologice, prezintă un caracter sistematic în distribuția lor în regiunile muntoase, pe de o parte, şi în regiunile oceanice, pe de alta: ele sînt puternic negative în zonele muntoase ale Globului şi, invers, puternic pozitive în cele oceanice. Mai mult decît atît: valorile lor absolute sînt cu atît mai mari cu cît este vorba de înălțimi, respectiv de adîncimi, mai mari.

Şi aceste două categorii de regularități, prezentate de anomaliile în aer liber şi de anomaliile Bouguer, sînt fapte de observație, bine stabilite, cu totul independente de orice ipoteză. Implicația lor în legătură cu distribuția maselor din interiorul nu prea adînc al Pămîntului este aceeaşi ca pentru deviațiile verticalei, chiar cu o generalizare corespunzătoare adăugării cazului regiunilor oceanice la acela — singurul considerat privitor la deviațiile verticalei — al regiunilor muntoase. Pentru a se putea explica întregul ansamblu de date de observație, trebuie să se admită că sub nivelul la care sînt ele raportate, masele terestre sînt mai „uşoare” sub zonele de altitudini mai mari ale continentelor şi mai „grele” sub zonele de adîncimi de asemenea mai mari ale bazinelor oceanice.

Atît deviațiile verticalei cît şi anomaliile gravimetrice arată, deci, că efectul surplusurilor exterioare de masă, constituite de blocurile continentale care se ridică deasupra nivelului mării, ca şi efectul lipsurilor relative de masă, datorite prezenței în depresiunile oceanice a unui strat de apă în locul stratelor mai dense ale crustei terestre, trebuie să fie compensate de efecte contrarii, avîndu-şi origina în deficite interioare de masă, în primul caz, şi în excese interioare de masă, în al doilea. Cu alte cuvinte, faptele amintite indică existența unei compensări între porțiunile de suprafață şi cele de adîncime ale Globului: unui surplus suprageoidic de masă — cum este un bloc continental de altitudine mai mare, în particular un masiv muntos — îi corespund porțiuni subgeoidice de masă mai mică iar unui defect de masă ca acela reprezentat de o depresiune oceanică îi corespund în interior porțiuni de masă mai mare. Rezultatul ar fi că în conuri de deschidere egală cu vîrful în centrul Pămîntului ar fi conținute mase egale, oricare ar fi altitudinea şi forma suprafeței topografice. În felul acesta s-ar realiza echilibrul maselor terestre desemnat prin termenul de izostazie.

Mesajul transmis de Pămînt sub forma regularităților semnalate în distribuția deviațiilor verticalei şi a anomaliilor gravimetrice la scară continentală-regională este descifrat, astfel, în termeni de echilibru izostatic. Dacă se trece dincolo de simpla descifrare şi se încearcă imaginarea mecanismului de realizare a compensării izostatice, se păşeşte pe un teren mai puțin sigur, alături de fapte intervenind ipoteze interpretative, adeseori suprasimplificatoare şi numai parțial justificate. Pentru schițarea concepției actuale, în cadrul căreia este considerat astăzi echilibrul izostatic, este recomandabil să amintim pe scurt cele două concepții, apărute aproape simultan, la mijlocul secolului trecut, care încearcă explicarea mecanismului compensării izostatice. Ele au reuşit să introducă oarecare ordine în acest domeniu, sistematizînd faptele şi polarizînd ideile, şi au contribuit cu elemente importante la elaborarea concepției actuale, ea însăşi încă departe de a fi perfect coerentă intrinsec şi în acord desăvîrşit cu toate datele de observație.

Plecîndu-se de la ideea că este necesar ca efectele gravimetrice datorite neregularității distribuției maselor terestre superficiale să fie neutralizate de efectele

unor neregularități antagoniste în distribuția maselor mai profunde, s-a admis (Pratt) că aceasta s-ar realiza prin variații de densitate, în sensul şi de amploarea care ar asigura compensarea. Imaginea aluatului, care are o densitate cu atît mai scăzută cu cît el creşte mai mult, a fost transpusă în domeniul orogenezei, considerîndu-se că formarea munților este asociată cu o micşorare corespunzătoare a densității maselor care îi formează ca şi a celor de sub ei; invers, fundului oceanelor, care ar reprezenta o coborîre a suprafeței Pămîntului în urma „tasării" crustei, i-ar corespunde densități crescute. În această concepție izostatică, densitatea formațiunilor de sub munți ar trebui să fie mai mică decît a celor de sub cîmpiile vecine pe cînd a celor de sub bazinele marine trebuie să fie mai mare, pînă la o adîncime la care este realizată condiția de a avea pentru toate compartimentele aceeaşi presiune.

Sub suprafața corespunzătoare acestei adîncimi, numită suprafață de compensare şi situată la ceva mai mult de o sută de kilometri sub nivelul mării, echilibrul din interiorul Pămîntului devine hidrostatic sau cvazihidrostatic (dacă este vorba de mase cu proprietăți vîscoase), după ce deasupra el fusese izostatic. Potrivit acestei concepții, ceea ce este variabil de la un compartiment la altul al crustei terestre ca şi în porțiunile corespunzătoare de sub crustă, pînă la suprafața de compensare, este densitatea. Ea scade pentru compartimentele continentale şi creşte pentru cele oceanice, cu accentuări ale variației, în sensul indicat, după altitudinile, respectiv adîncimile ce vin în vedere. Elementul constant pentru toate compartimentele este adîncimea suprafeței de compensare.

Cu acelaşi punct de plecare, cealaltă concepție izostatică (Airy) foloseşte o imagine intuitivă diferită: aceea a unei plute pe apă, cu trunchiurile care o formează nu prea strîns legate aşa ca fiecare să-şi ia echilibrul corespunzător dimensiunilor şi greutății sale. Se admite că masele crustale, de aceeaşi densitate medie oricare ar fi compartimentul considerat — continental sau oceanic —, plutesc pe mase subcrustale, de densitate mai mare, în care se afundă mai mult sau mai puțin, după cum se şi ridică mai mult sau mai puțin, la suprafață, realizîndu-se astfel în mod „arhimedian" echilibrul izostatic. Ceea ce este variabil, în cadrul acestei concepții izostatice, de la un compartiment crustal la altul, este grosimea crustei terestre, mare sub masivele muntoase, care au „rădăcini", şi mică sub depresiunile oceanice, unde sînt prezente „antirădăcini". Mărimea care rămîne constantă este densitatea medie.

Deşi cu totul deosebite în privința mecanismului pe care-l atribuie compensării izostatice, concepțiile Pratt şi Airy sînt echivalente din punctul de vedere al indicării unei posibilități principiale de realizare a ei. Ele conduc la rezultate aproape identice în calculele deviațiilor verticalei şi ale anomaliilor gravimetrice, cu condiția ca valori potrivite să fie adoptate pentru densitățile diverselor compartimente crustale şi pentru adîncimea suprafeței de compensare, în cazul celei dintîi, respectiv pentru diferența de densitate medie dintre materialul subcrustal şi crustal şi pentru grosimea crustei terestre în compartimentul continental de altitudine zero, în cazul celei de-a doua.

Nu pentru aprecierea plauzibilității lor — căci ele nu mai sînt acceptate astăzi, dat fiind schematismul lor excesiv — ci pentru a înțelege felul în care s-a ajuns la vederile actuale asupra izostaziei, vom supune cele două concepții izostatice unei sumare analize critice, pe baza criteriului reprezentat de acordul dintre premisele şi consecințele lor, pe de o parte, şi realitatea geofizică şi geologică, pe de alta. Să mai amintim însă, înainte de aceasta, că amîndouă au fost utilizate şi pentru a se aplica aşa-zisele „reduceri izostatice" datelor gravimetrice, urmărindu-se eliminarea efectelor care ar putea masca existența echilibrului izostatic sau abaterea de la el. Anomaliile izostatice, rezultate din compararea valorilor gravității, astfel reduse, cu valoarea normală au o semnificație geodinamică importantă pentru aprecierea stabilității crustei terestre în regiunea considerată.

Concepția Pratt, remarcabilă pentru comoditatea calculelor pe care le permite în vederea determinării efectelor compensării izostatice şi a reducerilor corespunzătoare, are o fundamentare fizico-geologică foarte modestă. Pe lîngă un caracter evident prea schematic, justificarea geologică inițială a ei se limitează la imaginea, discutabilă ea însăşi, a „dilatării" munților, provocată de încălziri locale ale maselor crustale. Ulterior a fost pusă în evidență şi adusă ca un argument în sprijinul acestei concepții diferența de compoziție a compartimentelor continentale, formate din roci mai acide, şi a celor oceanice, unde se accentuează bazicitatea rocilor. Diferențele de densitate corespunzătoare nu sînt, însă, de un ordin de mărime care să explice, cu exclusivitate, mecanismul compensării izostatice. Totuşi, constatarea că pentru unități geologice mari densitatea medie a rocilor eruptive care aflorează variază invers proporțional cu altitudinea la care apar ca şi aceea că vitezele de propagare ale undelor seismice sînt mai mari sub oceane decît sub continente indică, amîndouă, variații sistematice ale proprietăților maselor crustale cel puțin calitativ în sensul cerut de concepția Pratt.

Prezentînd dificultăți mai mari de ordin matematic, în transpunerea ei în termeni cantitativi, concepția Airy apare mai îndreptățită din punct de vedere geofizic şi geologic. Variabilitatea grosimii crustale, cu rădăcini pentru masivele muntoase şi antirădăcini pentru zonele oceanice — postulat fundamental al acestei concepții — nu a ridicat obiecții categorice din partea geologiei şi a primit confirmări cantitative din partea seismologiei şi a geofizicii în general. Valorile îngroşării crustale, corespunzătoare munților, calculate pe baza acestei concepții, concordă bine cu cele care rezultă din observațiile seismologice şi din datele sondajelor seismice adînci, în diverse zone ale Globului. Cercetările făcute în ultimul deceniu, în cadrul aşa-numitului „Proiect al mantalei superioare", au condus la ample evidențe geofizice şi geologice care arată că nu numai înrădăcinarea munților ci şi subțierea crustei sub oceane trebuie considerate ca realități indiscutabile. Rezerve în legătură cu concepția Airy există numai în privința ignorării proprietăților elastice ale crustei la scară continentală-regională, care impun compensării izostatice să aibă un caracter corespunzător, adică să se realizeze pentru unități tectonice mari şi nu local, pentru

fiecare neregularitate geomorfologică cum cere schematismul suprasimplificator pe care îl are şi această concepție.

S-ar părea astfel că acceptabilă în prezent ar fi concepția izostatică Airy. Într-adevăr, în vederile actuale asupra echilibrului izostatic se recunosc principalele trăsături ale ei, cu corectivul adus în legătură cu rezervele amintite mai sus.

Deosebit de interesant este faptul că, în esență, deşi nu în toată claritatea, aceleaşi trăsături se găsesc într-o pagină din preistoria izostaziei, care conține opiniile lui Leonardo da Vinci în această privință. Fără suportul obiectiv faptic al unor informații de felul celor rezultate din studiul deviațiilor verticalei şi al anomaliilor gravimetrice continentale-regionale, marele geniu al Renaşterii, despre ale cărui preocupări de ordin ştiințific marele public ştie relativ puțin, a avut intuiția a ceea ce numim azi echilibru izostatic şi chiar a încercat o explicație. Iată ce notează el în jurnalul său: „Acea parte de la suprafața oricărui corp greu se va depărta mai mult de centrul lui de greutate care va deveni mai uşoară. De aceea, porțiunea Pămîntului pe care rîurile erodează pantele munților şi le cară la vale este locul de pe care este îndepărtată o asemenea greutate; ea va deveni mai uşoară şi, în consecință, mai depărtată de centrul de greutate al Universului care totdeauna este coincident cu centrul de greutate al Pămîntului... Vîrfurile munților se ridică în continuu în decursul timpului...”

Astăzi, evident, problema se pune altfel şi descifrarea mesajului Pămîntului pe care îl reprezintă particularitățile deviațiilor verticalei şi ale cîmpului gravității, legate de echilibrul maselor terestre în imaginea compensării izostatice, se face, bineînțeles, în termeni mai precişi, care oferă şi posibilitatea unei transpuneri pe plan cantitativ, într-o încadrare matematică adecvată. Precedată de anticipări ingenioase ca aceea schițată de cuvintele oarecum vagi dar sugestive ale lui Leonardo da Vinci şi pregătită de vederile lui Airy printr-o conturare mai apropiată de realitatea geofizică-geologică, concepția actuală asupra fenomenelor izostatice se poate caracteriza printr-o mai fidelă şi mai detaliată reflectare a situației reale şi o sintetizare a ideilor şi a concepțiilor ce au precedat-o, care s-au dovedit a fi conforme cu datele de observație. Preluînd din concepția Airy postulatul variației grosimii crustei terestre, confirmat de ansamblul datelor geofizice, şi admițînd, în acord cu concepția Pratt, şi o variație a densității, pe care observațiile de asemenea o confirmă, vederile actuale depăşesc stadiul simplelor ipoteze. Concepția izostatică de azi, legată mai ales de numele lui Vening Meinesz, întregeşte elementele transmise de cele precedente cu ideea fundamentală, care îi este specifică, anume regionalitatea compensării.

După această concepție, în care — fără a fi complet înlăturat — schematismul celor anterioare este mult atenuat, crusta terestră are față de sarcina constituită de un masiv muntos comportarea unei plăci elastice: ea se deformează sub acțiunea sarcinii dar nu local ci pe o întindere laterală care depăşeşte dimensiunile acesteia cu atît mai mult cu cît reacțiunea elastică este mai puternică. În concluzie, variabilitatea grosimii

crustei terestre rămîne elementul de bază şi în concepția izostatică actuală dar i se impune un grad de regionalitate care să asigure realizarea compensării izostatice nu pentru fiecare element topografic ci pentru ansamblul căruia el aparține.

În încheierea prezentării informațiilor şi comentariilor privitoare la mesajele gravitaționale ale Pămîntului, descifrabile în termeni izostatici, făcută mai sus nu fără proiectarea situației actuale pe fondul trecutului, merită să se menționeze — fie şi numai în treacăt — două probleme conexe: anizostaziile şi acțiunile antiizostatice. Deşi, în ansamblu, crusta terestă este în echilibru izostatic — cum o demonstrează în modul cel mai convingător absența de corelație dintre anomaliile gravimetrice planetare-continentale şi distribuția maselor de uscat şi a oceanelor — există totuşi unele zone pe Glob unde observațiile arată că acest echilibru nu este realizat în prezent. În asemenea zone se manifestă precumpănitor fie tendința de restabilire a unui echilibru care, realizat în trecut, a fost deranjat prin schimbarea condițiilor de atunci, fie acțiunea unor agenți care lucrează în prezent împotriva echilibrului izostatic.

Absența echilibrului izostatic se pune în evidență — aşa cum am menționat deja — prin anomaliile izostatice, numite şi anizostazii. Supuse nu numai reducerilor obişniute ci şi celor „izostatice", care țin seama de compensarea efectelor gravitaționale ale distribuției de mase terestre superficiale prin distribuții corespunzător „antagoniste" în subsolul mai mult sau mai puțin adînc, datele gravimetrice prezintă în unele regiuni abateri sistematice, într-un sens sau altul, de la modelul ales convențional ca „normal". Evident, ținîndu-se seama de modul în care se aplică reducerile izostatice, anomaliile astfel stabilite au semnificația unor abateri de la compensarea postulată de concepțiile izostatice: anoizostaziile pozitive indică exces de masă în adîncime (supracompensări) pe cînd cele negative constituie simptome de deficite subgeoidice de masă (subcompensări); se înțelege că este vorba aici despre excese şi deficite în raport cu ceea ce în subsol ar asigura compensarea situației de la suprafață.

Exemple sînt relativ puține, dar elocvente. Vom cita cazul nordului continentului european, unde regiunea numită de geoştiințe Fennoscandia s-a găsit în echilibru izostatic atunci cînd era acoperită cu un strat de ghiață de grosime între 2 şi 2,5 kilometri. Acest echilibru a fost, evident, deranjat prin topirea gheții. În prezent o anizostazie negativă arată că în zona respectivă crusta terestră este afundată în masele subcrustale mai mult decît este necesar pentru echilibru în condițiile actuale şi că ea trebuie să se ridice pentru a se ajunge la restabilirea echlibrului. Lucrurile stau într-adevăr aşa, cum arată şi observațiile directe asupra liniilor de țărm şi, în special, măsurătorile geodezice de mare precizie ale nivelmentului repetat, care dau şi valoarea vitezei de ridicare: circa 9 milimetri pe an în partea centrală a golfului Bothnia, cu scăderi treptate spre sud-est pînă la valoarea zero în regiunea Leningrad.

Această ridicare postglaciară a Fennoscandiei este un exemplu tipic de reajustare izostatică la condiții noi. Cum am spus deja, în legătură cu diferența dintre valoarea gravimetrică şi cea astronomică a turtirii Pămîntului, şi acest fenomen de restabilire a echilibrului izostatic deranjat poate conduce, dacă este caracterizat prin parametri cantitativi, la indicații asupra vîscozității maselor din interiorul Globului. Evident, în acest caz este vorba de zonele mantalei superioare terestre.

Anizostazii pozitive au fost puse în evidență în regiunile deltelor marilor fluvii, unde încărcarea continuă a crustei terestre cu depozite aluvionare nu este compensată de deficite interioare de masă în ritmul desfăşurării ei. În consecință, crusta din regiune trebuie să se afunde în masele subcrustale, tinzînd spre stabilirea echilibrului izostatic. În prezent, în asemenea zone, se manifestă o supracompensare, căci masele subcrustale de densitate mai mare se găsesc prea aproape de suprafață, în porțiuni în care ar trebui să se găsească (şi se vor găsi în viitor) mase crustale mai puțin dense.

Vorbind despre anizostazii, am amintit implicit şi acțiunile antiizostatice. Există fenomene din a căror desfăşurare rezultă efecte de deranjare a echilibrului izostatic, cum sînt cele active în Fennoscandia şi în zonele de deltă. Să mai amintim, ca agenți antiizostatici importanți, cu desfăşurare destul de lentă în timp, fenomenele de eroziune şi sedimentare, care lucrează, în sensuri inverse, împotriva echilibrului izostatic. Cînd aceste două fenomene au loc în zone apropiate geografic, efectele contrarii pe care le produc pot contribui la creşterea instabilității crustei terestre: ridicarea regiunilor de eroziune activă şi subsidența celor de sedimentare se pot manifesta printr-o acțiune de forfecare care să ducă şi la efecte tectonice. Dacă mai este vorba şi de o zonă cu activitate seismică legată de alt substrat fizic, se înțelege că instabilitatea crustei terestre poate fi mult accentuată prin suprapunerea acțiunii, lente şi fără manifestări acute dar îndelungată, a eroziunii şi sedimentării în regiuni nu prea depărtate. Acesta pare a fi cazul în nordul Indiei, unde la seismicitatea ridicată datorită convergenței plăcilor indiană şi euroasiatică — fenomen despre care se va vorbi în capitolul privitor la imaginea dinamică a structurii Pămîntului — se adaugă efectele asociate ale eroziunii relativ intense a masivului himalayan şi ale depunerii produselor ei în zonele foarte apropiate ale bazinului Gangelui.

Regiunile care nu sînt în echilibru izostatic prezintă, astfel, cele mai interesante particularități geofizice. Din punctul de vedere care ne interesează în mod deosebit, trebuie să remarcăm că mesajele transmise de Pămînt sub forma anizostaziilor oferă dificultăți destul de mari încercărilor de descifrare a lor, dificultăți legate atît de caracterul convențional al modului de stabilire a anomaliilor izostatice cît şi de partea ipotetică a concepției în cadrul căreia se efectuează descifrarea. Ele pot conduce, însă, la informații dintre cele mai prețioase privind cauzele şi mecanismul deranjării echilibrului precum şi tendința de restabilire a lui şi mecanismul reajustării izostatice. Se poate ajunge chiar la mai mult, obținîndu-se indicații asupra unor proprietăți fizice (în particular vîscozitatea), caracteristice pentru materialul din mantaua Pămîntului.

De asemenea rezultă şi informații de mare importanță pentru geotectonică, în legătură cu comportarea elastică sau plastică a crustei terestre, în anumite condiții.

Măsura în care mesajele gravitaționale-izostatice ale Pămîntului vor putea fi descifrate în termeni mai precişi, pentru ca informațiile astfel obținute să-şi aducă contribuția la cunoaşterea structurii şi dinamicii crustei terestre şi a mantalei superioare, precum şi a proprietăților fizice ale materialelor care le constituie, depinde mai puțin de progrese intrinsece ale metodelor gravimetrice şi mai mult de ameliorarea tehnicilor de cercetare interdisciplinară, în particular de ritmul în care procedeele şi informațiile seismologice — şi, în general, geofizice — vor încadra pe cele gravimetrice.

●

Trecînd acum la ultima categorie de mesaje ale Pămîntului din cele pe care le-am desemnat, în ansamblu, prin însuşi titlul acestui capitol, luînd adică în considerare anomaliile gravimetrice regionale-locale, vom face de la început observația că, dacă în estimări comparative acordăm prioritate criteriului practic-economic, acestea apar ca fiind — cel puțin în prezent — cu mult cele mai importante dintre toate particularitățile cîmpului gravității. Avînd ca substrat fizico-geologic neregularitățile distribuției de densitate din zonele superioare ale crustei terestre, detectarea şi descifrarea mesajului transmis de ele conduc la informații asupra acestor neregularități, care pot fi structuri geologice, accidente tectonice sau acumulări de substanțe minerale de tot felul. În majoritatea cazurilor, acestea au implicații directe de primă importanță pe plan economic.

Atît detectarea cît şi descifrarea mesajelor gravitaționale ale Pămîntului la scară regională-locală constituie obiectul uneia din tehnicile cele mai importante ale cercetării geofizice a subsolului: prospecțiunile gravimetrice. Tehnica aceasta constă, în etapa ei pur metrologică şi de tratare a materialului de observație, în a evalua cu mare precizie variațiile gravității în cît mai multe puncte din regiunea studiată, a elimina din valorile observate influențele nesemnificative din punctul de vedere al structurii subsolului, a trece valorile astfel „reduse” pe harta regiunii şi a uni prin linii continue punctele ce prezintă aceeaşi variație a gravității în raport cu un anumit nivel de referință. Imaginile astfel obținute — hărți gravimetrice — scot în evidență felul în care variază densitatea în subsol. Astfel, zonele în care formațiuni de densitate mai mare se găsesc în apropierea suprafeței se vor manifesta prin valori ridicate ale gravității pe cînd cele în care formațiuni mai puțin dense se apropie de suprafață vor prezenta nivele mai joase ale valorilor acestei mărimi. Prezența sării, care de regulă are o densitate mai redusă decît a formațiunilor ce o găzduiesc se va trăda pe o hartă gravimetrică prin minime relative a căror situare şi formă indică amplasarea şi conturul aproximativ al masivului de sare.

Dacă în subsolul unei regiuni se află o falie (o discontinuitate într-o formațiune

de o anumită densitate, diferită de a celor din jur), cu unul din blocuri mai apropiat de suprafață decît celălalt, cartarea gravimetrică o va putea pune în evidență chiar dacă este acoperită, cu condiția ca efectul în variațiile gravității provocate de acest accident să fie măsurabil. De asemenea, se va manifesta în harta gravimetrică un anticlinal (o cută pozitivă a straturilor din subsol, formată din două pante ce coboară lateral dinspre o axă mijlocie comparabilă cu culmea unui deal alungit), care aduce, în general, mai aproape de suprafață formațiuni cu densități mai mari. Cum de asemenea particularități structurale sînt adeseori legate acumulări de petrol, prospecțiunile gravimetrice pot servi, pe această cale indirectă, la detectarea zăcămintelor respective, punînd în evidență nu petrolul ci condițiile favorabile acumulării lui.

In cazul zăcămintelor de minereuri, prospecțiunile gravimetrice pot da de asemenea rezultate bune cînd nu numai contrastul de densitate ci şi volumul mineralizațiilor prezintă valori mari pentru o adîncime relativ mică. În toate cazurile se manifestă, astfel, şi intervenția acestor caracteristici geometrice ale formațiunii din subsol: volumul şi adîncimea, pe lîngă parametrul fizic care este contrastul de densitate.

Se înțelege că prospecțiunile gravimetrice pot furniza informații prețioase asupra structurii subsolului, indicînd modul în care sînt distribuite densitățile. Directe, ca pentru sare şi minereuri, ori indirecte, ca pentru petrol şi gaze, prospecțiunile gravimetrice contribuie într-o măsură importantă la detectarea zăcămintelor şi la conturarea lor.

Din prezentarea care precedă, s-ar părea că tehnica prospecțiunilor gravimetrice s-ar limita la faza de detectare a mesajului pe care îl reprezintă anomaliile gravimetrice, constituind obiectul lor, şi că acesta ar fi atît de elocvent prin el însuşi că n-ar mai comporta nici o descifrare. De fapt lucrurile stau cu totul altfel. Etapa de măsurare şi tratare a datelor gravimetrice este totdeauna urmată de o laborioasă etapă de interpretare a rezultatelor obținute.

În cadrul acestei etape, anomaliile gravimetrice cartate la suprafață (mesajul detectat) sînt legate de cauzele lor necunoscute din subsol, cărora se încearcă să li se determine cît mai mulți parametri de definire geometrică şi fizico-geologică (descifrarea mesajului). Interpretarea fizică sau analiza cantitativă a datelor gravimetrice şi interpretarea lor geologică duc astfel la valorificarea finală, din punctul de vedere al cunoaşterii şi înțelegerii structurii subsolului, a rezultatelor studiului anomaliilor regionale-locale ale cîmpului gravității.

Ținînd seama de scopul pe care-l urmărim aici, ne-am putea limita la cele de mai sus. Este bine, totuşi, să le mai adăugăm observația cu totul generală că descifrarea actuală a mesajelor gravitaționale ale Pămîntului care pot fi transpuse în termeni fizico-geologici de definire a alcătuirii subsolului se caracterizează prin progrese remarcabile în cele două direcții majore de creştere a eficienței operației: îmbunătățirea

raportului semnal/zgomot şi restrîngerea ambiguității problemei inverse pe care o reprezintă interpretarea rezultatelor. O exemplificare, în această privință, ar fi interesantă şi convingătoare dar ne-ar duce prea departe, căci ea nu se poate face fără detalii de ordin tehnic ce ar depăşi cu siguranță cadrul pe care ni l-am impus.

•

Cu aceasta am ajuns la capătul expunerii care a avut ca obiect prezentarea manifestărilor terestre ale atracției universale, considerate ca mesaje ale Pămîntului. Drumul pe care a trebuit să-l parcurgem pentru a face cunoştință cu aceste mesaje şi cu modalitățile de descifrare a lor n-a fost, desigur, lipsită de asperități dar nici de interes.

Particularitățile variate ale distribuției cîmpului gravității, manifestate în majoritatea cazurilor prin partea cu mult cea mai importantă a acestuia, cea gravitațională, s-au dovedit a fi purtătoarele unor mesaje bogate în înțelesuri din partea planetei noastre. De la indicarea valorii pe care o are masa totală a Pămîntului şi pînă la localizarea unei structuri petrolifere, datele gravimetrice sînt susceptibile de a da variate informații asupra felului în care este realizată, la toate scările, distribuția maselor terestre ca şi asupra unor proprietăți fizice ale lor.

Forma Pămîntului şi mareele terestre la scară planetară-continentală, echilibrul maselor crustale la scară continental-regională şi structura mai mult sau mai puțin de suprafață a crustei Pămîntului la scară regională-locală reprezintă principalele domenii în care se înscriu performanțele informaționale ale mesajelor gravitaționale terestre. Interesînd, în general, ansamblul geoştiințelor, informațiile care rezultă din descifrarea acestor mesaje ale Pămîntului au strînse contingențe, în particular, cu geodezia, cu geodinamica, respectiv cu geologia şi arată că, dacă gravimetria nu spune totul despre Pămînt, ea spune, totuşi, mult.

3. PĂMÎNTUL CA MAGNET

„Acele experiențe care au fost demonstrate cu ajutorul Terrellei, privitoare la felul în care corpurile magnetice se comportă față de Terrella, sînt toate sau cel puțin cele principale şi mai importante dintre ele prezentate de Globul terestru... Pămîntul însuşi este un mare magnet.”
WILLIAM GILBERT

„Personaj totdeauna puțin comunicativ chiar pentru intimii săi, cîmpul magnetic terestru are o solidă reputație de a fi complicat şi enigmatic. Dacă nu ar fi oferit tuturor, aşa cum o face, un mijloc de orientare desigur imprecis dar atît de comod, el ar fi ignorat de marele public pentru care ştiința magnetismului terestru se reduce la capitolul busolei. Şi totuşi, ce varietate în manifestările sale, ce bogăție de înrudiri adeseori neaşteptate cu atîtea fenomene aparținînd tuturor ramurilor geofizicii, precum şi geologiei şi astrofizicii.”
ÉMILE THELLIER

În vederea abordării problemelor care constituie obiectul capitolului de față, cititorului i se oferă, ca termeni inițiali de referință, imaginile sugerate de cele două citate de mai sus: o structură a cîmpului magnetic al Pămîntului asemănătoare cu aceea a cîmpului unei sfere magnetizate uniform, reprezentînd un model redus al Terrei — de aici numele de Terrella —, şi o mare complicație şi varietate în manifestările acestui cîmp, produs printr-un mecanism încă incomplet elucidat şi legat de multe alte fenomene terestre şi extraterestre. Pentru a evita o eventuală interpretare derutantă a titlului adoptat pentru acest capitol şi a citatului din celebra carte a lui Gilbert — contemporanul lui Shakespeare —, considerată ca primul tratat de geomagnetism, şi pentru a asigura în orice caz utilitatea efectivă a acestor imagini, sînt necesare cîteva precizări preliminare.

Trebuie subliniat, mai întîi, că sugestia ale cărei purtătoare sînt cuvintele lui Gilbert urmează să fie acceptată cu corectivul indicat de titlul capitolului: Globul terestru nu este, de fapt, „un mare magnet” ci doar se comportă, în privința structurii spațiale a cîmpului lui magnetic, ca şi cînd ar fi aşa ceva, deci numai din acest punct de vedere putem considera „Pămîntul ca magnet”. Cîmpul unui magnet, aproximativ echivalent cu acela al unei sfere uniform magnetizate — cum este Terrella —, reprezintă apoi o modelare idealizatoare a cîmpului geomagnetic, acceptabilă numai într-o primă aproximație. La o examinare mai de aproape se constată că o asemenea modelare este de fapt o suprasimplificare a realității, căci anatomia cîmpului geomagnetic prezintă abateri, care nu sînt nici puține nici neglijabile, de la imaginea astfel rezultată. Trebuie, deci, ca chiar pentru distribuția în spațiu a cîmpului geomagnetic să avem în vedere avertismentul tacit din cuvintele celui de-al doilea

citat: complicaţie şi varietate.

Adevărata complicaţie şi varietate a cîmpului geomagnetic se manifestă, însă, din plin în evoluţia în timp a lui. Tot în acest domeniu apare pregnantă şi bogăţia de înrudiri cu alte fenomene, nu numai terestre ci şi extraterestre, în particular solare. Cîmpul magnetic al Pămîntului este variabil în timp, schimbările lui avînd o mare varietate şi complicaţie în formele de prezentare ca şi în mecanismul de producere şi manifestînd paralelisme cu diverse fenomene geofizice şi heliofizice. Corelarea acestor fenomene pe baza substratului lor fizic s-a dovedit deosebit de utilă pentru lămurirea multor probleme privind fiziologia cîmpului geomagnetic.

În fine, pare indicat să completăm acest preambul schematic al capitolului asupra magnetismului terestru cu încă o anticipare: partea din cîmpul geomagnetic care are o structură mai simplă şi care îi determină în mod hotărîtor distribuţia în spaţiu este datorită unor cauze situate în interiorul Pămîntului, pe cînd cea care îi complică sensibil atît anatomia cît şi fiziologia, privind în particular schimbările în timp, are cauze externe. Prezente în manifestările distribuţiei în spaţiu ca şi în acelea ale evoluţiei în timp, complicaţia şi varietatea de manifestări ale cîmpului geomagnetic sînt, aşadar, preponderente în a doua categorie de fenomene, reprezentate de variaţiile în timp, suprapuse peste fondul general al cîmpului principal.

Ce este oarecum surprinzător este faptul că, în ciuda unei relative simplităţi a imaginii repartiţiei geografice — şi chiar, în general, spaţiale —, tocmai cîmpul geomagnetic de origine internă este cel care rămîne încă, în mare măsură, „enigmatic", mecanismul fizic al producerii lui fiind imperfect explicat la ora actuală. În schimb, deşi de un grad de complicaţie morfologică şi fenomenologică mult mai ridicat, cîmpul extern apare ca rezultat al unei înlănţuiri de procese fizice încadrate în concepţii explicative coerente şi în bună parte verificate direct, prin confruntare cu realitatea.

La capătul acestor consideraţii preliminare, putem face observaţia că marea complexitate şi diversitate a fenomenologiei geomagnetice, caracterizate în ansamblu prin numeroase particularităţi ale dublei variaţii în spaţiu şi în timp a cîmpului, se reflectă în mulţimea şi varietatea mesajelor magnetice ale Pămîntului şi, de asemenea, în dificultăţile legate de descifrarea acestora. Remarcînd acest lucru, atragem ipso facto atenţia asupra interesului prezentat de domeniul geomagnetismului pentru cunoaşterea şi înţelegerea interiorului şi exteriorului planetei noastre, de la procesele din nucleu responsabile de producerea cîmpului principal pînă la fenomenele din ionosferă şi din magnetosferă ale căror efecte apar în variaţiile şi în perturbaţiile geomagnetice. Aceeaşi observaţie subliniază, simultan, necesitatea de a se face apel, pentru detectarea şi descifrarea mesajelor geomagnetice, la mijloace de investigaţie instrumentale şi conceptuale cît mai eficace, adecvate naturii fizice a fenomenelor din a căror suprapunere şi înlănţuire complexă rezultă cîmpul geomagnetic, ordinului de

mărime a acestuia şi scării de cercetare.

•

Cum se ştie, existența unui cîmp magnetic se manifestă, printre altele, prin acțiunea de orientare exercitată asupra unui ac magnetic liber, acesta luînd, în fiecare punct din domeniul spațial în care există un astfel de cîmp, o direcție bine determinată. Sensul orientării este de asemenea determinat: totdeauna acelaşi capăt al magnetului se orientează spre aceeaşi parte a dreptei reprezentative a direcției date.

Observațiile arată că în orice punct de pe Pămînt, la suprafață ca şi în puțuri adînci sau la altitudini mari, deasupra continentelor ca şi deasupra oceanelor, în apropierea ecuatorului ca şi în regiunile polare, un magnet liber să se orienteze oricum — adică suspendat în centrul lui de masă şi sustras acțiunii oricărui cîmp magnetic artificial sau altor factori perturbanți — ia, la un moment dat, o orientare determinată. Astfel este pusă în evidență omniprezența unui cîmp magnetic al Pămîntului. Se obişnuieşte ca proprietatea planetei noastre de a provoca acest fenomen să fie desemnată prin termenul de magnetism terestru, iar pentru disciplina geofizicii care îi studiază diversele manifestări şi mecanismul de producere a proceselor care constituie substratul lor, urmărindu-le totodată şi explicarea, s-a impus numele de geomagnetism. Aplicațiile ştiinței geomagnetismului la studiul structurii subsolului se numesc în mod curent prospecțiuni magnetice, reprezentînd una din tehnicile eficace ale geofizicii aplicate.

Magnetismul terestru nu se manifestă prin nici un efect direct care să aibă o acțiune imediată asupra vreunui simț al omului, cum se întîmplă în cazul celuilalt cîmp natural al Pămîntului, cîmpul gravific. Într-adevăr, simpla cădere a unui corp şi, apoi, ridicarea lui indică existența acestui cîmp şi, măcar în mod vag, unele caracteristici ale lui ca direcția şi mărimea forței corespunzătoare, legată de senzația de efort muscular. Apoi, cum spune Marin Sorescu:

„Ştim precis
Că nu poate sări nimeni
Mai sus decît tavanul
Să fie şi Dumnezeu,
Asta din cauza gravitației
Care ne trage mereu în jos
Încă din cele mai vechi timpuri".

În schimb, nici un fenomen din viața de toate zilele nu scoate la iveală realitatea prezenței permanente a cîmpului geomagnetic, după cum nu se cunoaşte nici vreun echivalent sensorial al unei eventuale influențe a lui asupra omului.

Acțiunea de orientare exercitată asupra unui ac magnetic nu este singura

modalitate de manifestare a cîmpului geomagnetic. Ca pentru orice cîmp magnetic, existența lui mai poate fi revelată cu ajutorul corpurilor în stare să se magnetizeze puternic — corpuri care au, cum se spune, o susceptibilitate magnetică ridicată — care devin, în cîmpul geomagnetic, în mod temporar sau permanent, magneți mai slabi sau mai puternici. Cîmpul geomagnetic îşi mai trădează existența prin faptul că el provoacă într-un circuit închis, fără sursă de curent dar în rotație, curenți electrici mai slabi sau mai intenşi, exceptînd doar cazul cînd axa de rotație a circuitului are chiar direcția cîmpului.

Aceste trei posibilități de manifestare calitativă a existenței cîmpului geomagnetic pot fi transpuse în cadrul mai amplu al fenomenologiei căreia aparțin şi încorporate instrumental şi metodologic în tehnici de măsurare. În asemenea forme, foarte îngrijit elaborate, cele trei categorii de fenomene sînt folosite pentru determinarea cantitativă a cîmpului geomagnetic, atît ca valori absolute cît şi ca variații în spațiu sau în timp, cu o precizie remarcabilă. Pe ele se bazează măsurătorile tradiționale ale geomagnetismului şi ale prospecțiunilor magnetice, măsurători al căror ansamblu de instrumente şi tehnici formează magnetometria clasică.

Acțiunea exercitată de cîmpul geomagnetic asupra unui magnet duce, cum am spus, la o orientare determinată a acestuia, care coincide cu orientarea cîmpului doar cînd magnetul nu este supus nici unei constrîngeri străine. Magnetul suferă numai o rotație — fără translație —, ceea ce pune în evidență intervenția exclusivă a unui cuplu de forțe, fără posibilitatea existenței unei forțe izolate. Acest cuplu se manifestă static prin starea de echilibru impusă magnetului, echilibru care se poate realiza cu axa magnetului în direcția şi sensul cîmpului geomagnetic, cînd alt cuplu este absent, sau într-o altă poziție sub acțiunea combinată a cuplului magnetic şi a unui cuplu antagonist, care poate fi un cuplu gravitațional, un cuplu elastic sau unul de torsiune. Cuplul exercitat de cîmpul geomagnetic asupra unui magnet se mai poate manifesta şi dinamic, prin transpunerea acestuia în oscilație. Studiul ambelor categorii de „acțiuni pondero-motrice”, prin reperarea poziției de echilibru sub acțiunea exclusivă a cîmpului geomagnetic sau sub acțiunea cuplului generat de el şi a unor cupluri de altă natură dar cunoscute, şi prin determinarea perioadei de oscilație, constituie importante mijloace de evaluare cantitativă a direcției şi intensității cîmpului geomagnetic.

Magnetizarea corpurilor cu susceptibilitate ridicată, adică fenomenul de inducție magnetică, a condus de asemenea la construirea unor aparate şi la punerea la punct a unor tehnici de măsurare adecvate care au jucat un rol important în dezvoltarea metrologiei geomagnetice, atît terestre cît şi aeriene, şi chiar în măsurătorile efectuate cu ajutorul rachetelor şi sateliților artificiali ai Pămîntului. Repartiția direcțională a efectelor de inducție magnetică după dimensionarea relativă a părților din aparate reprezentate de corpurile supuse magnetizării şi amplificarea convenabilă a acestor efecte au asigurat excelente condiții pentru prinderea cantitativă, foarte precisă, a

cîmpului geomagnetic, ca direcţie şi ca mărime, în toate particularităţile evoluţiei lui în timp ca şi, poate mai mult încă, în acelea ale distribuţiei lui în spaţiu.

Cel de-al treilea fenomen al magnetometriei clasice, inducţia electromagnetică, deşi principial mai versatil, a avut şi are o contribuţie mai modestă pe plan metrologic. Bobine rotitoare au fost folosite încă din prima jumătate a secolului trecut, fie pentru măsurarea intensităţii componentelor cîmpului geomagnetic, fie pentru reperarea orientării lui. În primul scop, trebuia, evident, ca axa de rotaţie a bobinei să fie ortogonală faţă de direcţia cîmpului şi să se măsoare curentul indus în aceste condiţii, pe cînd pentru cel de-al doilea se căuta orientarea axei pentru care rotirea bobinei rămînea fără efect în privinţa producerii unui asemenea curent, ceea ce însemna paralelism între axă şi direcţia cîmpului. Folosite şi la începuturile aeromagnetometriei, procedeele bazate pe inducţia electromagnetică nu s-au dovedit competitive cu celelalte tehnici de măsurare şi astăzi nu se mai menţine decît vechea metodă de zero pentru reperarea orientării cîmpului geomagnetic.

Caracteristic pentru măsurătorile geomagnetice tradiţionale, bazate pe utilizarea celor trei categorii de fenomene amintite, este faptul că ele conduc la cunoaşterea cîmpului geomagnetic prin intermediul unor unghiuri care îi definesc orientarea şi a unor componente ale intensităţii lui după direcţii legate de amplasamentul pe Glob al locului de măsurare. Raportat la un sistem local de referinţă, definit de planul orizontal şi de direcţia nord, deci la un sistem de axe trirectangulare orientate după direcţia nord, direcţia est şi direcţia verticală, cîmpul geomagnetic este determinat, fără ambiguitate, dacă se cunosc trei mărimi (numite elemente geomagnetice): fie două unghiuri şi intensitatea (sau o componentă a ei), fie două componente ale intensităţii şi un unghi, fie trei componente ale intensităţii. Prima modalitate de definire a fost cea exploatată mai întîi şi mai este folosită şi azi în unele determinări de valori absolute. Elementele geomagnetice măsurate pe această cale sînt: 1) declinaţia magnetică D, reprezentată de unghiul format de proiecţia cîmpului pe planul orizontal cu direcţia nord; 2) inclinaţia magnetică I, adică unghiul dintre direcţia intensităţii cîmpului şi această proiecţie a ei pe planul orizontal şi 3) componenta orizontală H a cîmpului, deci tocmai această proiecţie pe planul orizontal. A doua modalitate este utilizată în particular în înregistrările geomagnetice de observator, în cadrul cărora se urmăresc variaţiile declinaţiei ΔD, ale componentei orizontale ΔH şi ale celei verticale ΔZ. În aceste două categorii de determinări se utilizează preponderent efectele pondero-motrice; numai inclinaţia este măsurată prin metoda de zero a inducţiei electromagnetice. În fine, determinarea cîmpului prin trei componente rectangulare, după cele trei axe indicate: componenta nord X, componenta est Y şi componenta verticală Z se face cu aparatele bazate pe inducţia magnetică, cu barele care se magnetizează orientate corespunzător. (Se poate menţiona aici că utilizarea celor trei componente rectangulare este preferată şi în cercetările teoretice.)

Cu aproximativ un deceniu şi jumătate în urmă, au început a fi luate în

considerare în scopurile metrologiei geomagnetice, pentru a fi apoi efectiv introduse şi utilizate pe o scară tot mai largă în măsurători, alte două fenomene capabile să pună în evidență existența cîmpului geomagnetic şi să servească, asigurînd precizia necesară, la evaluarea cantitativă a lui: precesia nucleară şi „pomparea optică". În ambele fenomene au loc procese intraatomice, guvernate ca atare de legile mecanicii cuantice. Folosite pentru măsurarea indirectă a cîmpului geomagnetic, care intervine într-un mod cunoscut cantitativ în desfăşurarea lor, împreună cu alte mărimi determinabile, ele au condus la construirea unor aparate şi la elaborarea unor metode constituind, în ansamblu, partea modernă a metrologiei geomagnetice, desemnată prin termenul de magnetometrie cuantică.

În primul caz, prin aplicarea unui cîmp magnetic auxiliar intens, cu aproximativ două ordine de mărime mai puternic decît cel al Pămîntului, şi de direcție transversală față de a acestuia, nucleele posedînd un moment magnetic ale unor atomi — în metrologia geomagnetică este vorba, în mod curent, de hidrogen, al cărui nucleu este chiar protonul, de unde termenul de precesie (sau rezonanță) protonică, frecvent folosit în acest domeniu — sînt orientate cu axele lor magnetice după această direcție, impusă de cîmpul auxiliar (cîmp de polarizare). Cînd se suprimă acest cîmp, micii magneți reprezentați de nucleele cu moment magnetic (în cazul hidrogenului: protonii) rămîn sub influența exclusivă a cîmpului geomagnetic, spre a cărui orientare tind. Revenirea de la direcția cîmpului magnetic de polarizare la aceea a cîmpului geomagnetic are loc printr-o mişcare de precesie, a cărei frecvență este proporțională cu intensitatea acestuia. Astfel, determinarea frecvenței de precesie şi cunoaşterea constantei de proporționalitate, furnizată de fizică, asigură determinarea intensității totale a cîmpului geomagnetic.

Cazul al doilea, al pompării optice, utilizează indirect efectul Zeeman, care din cauza ordinului de mărime foarte redus al cîmpului geomagnetic nu poate servi direct la determinarea intensității acestuia, prin măsurarea „despicării" liniilor spectrale emise de atomii supuşi influenței lui. Iradiindu-se anumiți vapori alcalini cu o lumină monocromatică, de frecvență strict corespunzătoare energiei unui subnivel dat dintre acelea între care sînt distribuiți electronii unui nivel energetic din atomii respectivi, sub influența cîmpului geomagnetic, electronii acestui subnivel sînt ridicați la un nivel superior. De aici ei „cad" înapoi la nivelul inferior inițial, distribuindu-se între subnivelele lui. Continuîndu-se iluminarea vaporilor cu radiația de frecvență optică determinată, electronii subnivelului ce-i corespunde sînt mereu ridicați la nivelul superior, de unde iarăşi revin la cel inferior, în care nu pot, însă, rămîne decît pe alte subnivele decît cel de pe care au plecat. În cele din urmă, toți electronii subnivelului avut în vedere sînt „pompați optic" de pe acest subnivel pe celălalt subnivel sau pe celelalte subnivele ale nivelului inferior, prin ocolul reprezentat de trecerea pe nivelul superior, corespunzător energiei radiației optice de pompare. În acest moment, radiația de pompare nu mai este absorbită şi „celula de gaz", în care se găsesc vaporii iradiați, devine transparentă pentru ea. Celula redevine opacă dacă intervine din nou

absorbția, ceea ce este posibil numai dacă apar din nou electroni pe subnivelul în cauză. Redistribuirea electronilor între subnivelele nivelului inferior se poate realiza prin excitare cu o radiație de frecvență mai mică, corespunzătoare diferenței de energie dintre subnivele. Frecvența acestei radiații de excitare este proporțională cu intensitatea cîmpului geomagnetic şi, astfel, această mărime se poate determina pe baza măsurării frecvenței radiației de excitare, care reopacizează celula cu vapori alcalini.

În ambele categorii de determinări, prin precesie protonică sau prin pompare optică, ceea ce se măsoară direct este o frecvență — măsurare care necesită un aparataj electronic complicat dar care se poate efectua cu mare precizie — iar ca rezultat geomagnetic se obține valoarea cîmpului total. Precizia determinărilor este foarte ridicată şi aparatele, care cu un deceniu în urmă aveau volume şi greutăți incompatibile cu transportul şi determinările pe teren, au ajuns astăzi la dimensiuni reduse, departe de a mai fi prohibitive în această privință.

Metrologia geomagnetică, ale cărei probleme generale au fost discutate în cele ce preced, este cea mai variată şi mai complicată dintre toate metrologiile geofizice. Această împrejurare — care a determinat şi trecerea în revistă de mai sus — se datoreşte, fără îndoială, marii variații şi complicații a fenomenelor în care intervin mărimile ce trebuie măsurate şi problemelor grele puse de variațiile nu numai de la un loc la altul ci şi de la un moment la altul ale cîmpului geomagnetic.

Determinarea valorilor absolute ale acestui cîmp într-un loc şi la un moment dat, pe de o parte, şi evaluarea variațiilor lui în spațiu şi în timp, pe de alta, reprezintă operații delicate de detectare şi de identificare a unor mesaje importante ale Pămîntului. Trimise din regiuni foarte îndepărtate, din nucleul terestru ca şi din ionosferă şi din magnetosferă, adică de la adîncimi şi de la altitudini de mii de kilometri, ele aduc informații complexe şi deosebit de prețioase, într-o formă care trebuie prinsă cu fidelitate, adeseori în condiții mult îngreuiate de valoarea relativ redusă a semnalului util şi de intervenția a numeroşi agenți perturbanți, care ridică în mod considerabil nivelul „zgomotului".

Îmbunătățirea raportului semnal/zgomot este neapărat necesară pentru a se asigura descifrarea mesajelor corespunzătoare cu un grad rezonabil de certitudine. Condiție necesară, ridicarea preciziei determinărilor prin amplificarea fără distorsionare a semnalelor — cînd acest lucru este posibil — şi prin mărirea sensibilității aparatelor nu este, totuşi, suficientă. Pentru a se garanta condițiile unei bune descifrări a mesajelor geomagnetice, detectarea şi identificarea lor trebuie completate cu cît mai multe informații geofizice extramagnetice. Numai pe această cale se poate reduce ambiguitatea fatal legată de operația de descifrare, care implică rezolvarea unei probleme inverse: identificarea şi caracterizarea cauzelor pe baza cunoaşterii efectelor lor.

•

Din cele cîteva anticipări privitoare la marea varietate şi complicaţie a fenomenelor geomagnetice şi din informaţiile, oricît de sumare, asupra modului în care se abordează studiul lor cantitativ rezultă clar necesitatea de a se examina ceva mai de aproape structura complexă a cîmpului magnetic al Pămîntului. O vom face în cadrul unei prezentări inevitabil schematice, care va încerca, totuşi, să cuprindă nu numai o simplă înşirare a principalelor caracteristici ale cîmpului geomagnetic şi ale variaţiilor lui spaţiale şi temporale ci şi cîteva indicaţii asupra mecanismului fizic al substratului lor fenomenologic. În felul acesta vom putea considera, ulterior, mesajele geomagnetice ale Pămîntului într-o perspectivă care, asigurînd prinderea coerentă a ansamblului, nu va împiedica recunoaşterea cîtorva detalii semnificative.

Observaţiile efectuate asupra cîmpului geomagnetic, cu ajutorul mijloacelor de investigaţie instrumentală amintite mai înainte, reuşesc să scoată în evidenţă — uneori direct, alteori după un tratament mai pretenţios al datelor obţinute — principalele trăsături ale lui şi chiar să furnizeze informaţii asupra originii lui, cel puţin ca amplasare spaţială dacă nu ca mecanism fizic. Cea mai generală informaţie rezultă din faptul că dacă observaţiile sînt făcute în diferite locuri de pe Pămînt, la o aceeşi „epocă", respectiv dacă sînt repetate la diferite momente, într-un acelaşi loc, apare în toată evidenţa că magnetismul terestru are o distribuţie în spaţiu determinată şi o evoluţie în timp caracteristică. Dubla variabilitate a cîmpului geomagnetic, cu locul şi cu timpul în care se fac observaţiile, cu alte cuvinte structura lui spaţio-temporală, reprezintă un mesaj deosebit de complex al Pămîntului, a cărui descifrare a ridicat în faţa cercetătorilor numeroase dificultăţi, numai în parte depăşite la ora actuală.

Un prim pas spre rezolvarea problemelor legate de lămurirea structurii complexe a cîmpului geomagnetic a fost făcut prin discriminarea între partea perisistentă a lui, cu tendinţe de menţinere la orientări şi la valori aproape constante pentru durate lungi, de ordinul de mărime al lunilor şi chiar al anilor, şi partea trecătoare a cîmpului, reprezentînd abateri într-un sens şi altul de la valorile medii corespunzătoare cîmpului persistent, unele periodice, altele cu totul neregulate, desfăşurate în decursul unei zile, respectiv în intervale şi mai scurte de timp (ore, minute şi chiar mai puţin).

Trebuie notat că partea persistentă a cîmpului prezintă o distribuţie caracteristică în spaţiu, corespunzătoare într-o primă aproximaţie distribuţiei cîmpului unei sfere uniform magnetizate, şi are şi o lentă evoluţie în timp, numită variaţie seculară. În privinţa părţii trecătoare, caracteristic este faptul că prezentînd, pe de o parte, variaţii calme şi periodice şi pe de alta schimbări agitate şi sporadice, ea manifestă şi o repartiţie spaţială a intensităţii ambelor categorii de exteriorizări morfologice ale evoluţiei în timp a cîmpului, evidente de altfel şi în unele regularităţi ale distribuţiei în timp a momentelor de apariţie.

Cele două părți constitutive ale cîmpului geomagnetic astfel puse în evidență — cea persistentă prin medieri pentru intervale lungi de timp, cea tranzitorie prin abateri momentane de la mediile obținute în felul acesta — se prezintă în proporții relative de complet dezechilibru: partea persistentă, totdeauna prezentă, reprezintă aproape în întregime cîmpul geomagnetic pe cînd cea trecătoare, de valori foarte mici, care uneori se pot chiar anula, abia dacă se ridică, în perioadele de maxim de intervenție a ei, la cîteva promile pentru variațiile calme şi este, de regulă, de acelaşi ordin de mărime şi pentru perturbații; numai în epoci de agitații extreme ale cîmpului — agitații desemnate atunci prin termenul de furtuni magnetice — perturbațiile pot atinge ordinul de mărime al cîtorva, puține, procente. Se înțelege că, pentru aceste motive, partea persistentă a cîmpului geomagnetic a putut fi numită cîmp geomagnetic principal, termen pe care îl vom folosi şi noi de acum înainte pentru a o desemna.

Atît cîmpul geomagnetic persistent, deci cel principal, cît şi cîmpul tranzitoriu au fost supuse aşa-numitei analize armonice sferice. Este vorba de o operație matematică pur formală dar care are un substrat fizic nu numai pentru încadrarea ei conceptuală ci şi pentru rezultatele la care conduce. Ea utilizează nişte funcții matematice de cele trei variabile care asigură reperarea poziției unui punct pe o sferă: raza sferei, longitudinea şi latitudinea. Aceste funcții, reprezentînd autentice instrumente de cercetare şi numite funcții sferice, sînt caracterizate prin două proprietăți remarcabile: posibilitatea de a reprezenta o distribuție oarecare de valori, oricît de complicată, pe o sferă şi caracterul lor de funcții „armonice”, satisfăcînd, deci, cunoscuta ecuație a lui Laplace, căreia trebuie să i se supună valorile unui cîmp care „derivă dintr-un potențial” (în sensul indicat în capitolul precedent).

Forma funcțiilor sferice fiind dată, li s-au determinat coeficienții numerici pe baza valorilor cîmpului, măsurate în cît mai multe puncte de pe Glob, de amplasament cunoscut, deci pentru valori cunoscute ale celor trei variabile. Independent de orice ipoteză — afară de premisa aproximării suprafeței terestre printr-o sferă şi de aceea a caracterului potențial al cîmpului geomagnetic —, s-a procedat la analizarea cîmpului astfel reprezentat matematic, plecîndu-se de la constatarea că la suprafața Pămîntului, unde se efectuează determinările, nu există surse de cîmp magnetic. În felul acesta, fără a se imagina vreun mecanism căruia să i se atribuie producerea cîmpului, se admitea numai că sursele lui pot fi situate în interiorul sau în exteriorul Pămîntului, ori atît în interior cît şi în exterior.

Pentru partea persistentă a cîmpului geomagnetic, numeroasele analize efectuate în ultimul secol şi jumătate, pe baza unui material de observație satisfăcînd din ce în ce mai bine exigențele principale ale operației — ca număr de stațiuni de măsurare, ca distribuție geografică a lor şi ca precizie a determinărilor — au arătat că ea este datorită aproape în întregime unor cauze situate în interiorul Pămîntului. După ultimele analize armonice sferice, mai mult de 99% din cîmpul geomagnetic principal rezultă a fi de origine internă. S-au confirmat, astfel, cu o precizie mai ridicată decît în

trecut, rezultatele unei întregi serii de analize — cea dintîi datînd din prima jumătate a secolului trecut —, stabilindu-se cu toată certitudinea, ca sediu al fenomenelor fizice responsabile de producerea cîmpului geomagnetic principal, interiorul Globului terestru. A trebuit astfel să se renunțe la vechea concepție, nu lipsită de rezonanțe poetice, a evului mediu, după care magnetismul terestru ar fi fost provocat de cauze externe şi care, în consecință, atribuia stelei polare forța de orientare spre nord a acului busolei. Este adevărat că experiențele lui Gilbert cu Terrella zdruncinaseră serios această concepție, al cărei ecou se găseşte şi într-o terțină din „Paradisul" lui Dante:

„Din miezu-unei lumini din noua roată
un glas țîşni şi m-am întors grăbit,
ca acul către steaua-n cer cătată".
(trad. Eta Boeriu)

Fundamentată cantitativ pe măsurători ale cîmpului geomagnetic şi nu pe analogii sugerate de un model, rezultatele analizei armonice sferice înlăturau definitiv ideea originii externe a cîmpului principal.

Tot în legătură cu cîmpul geomagnetic principal, trebuie să mai adăugăm că a fost efectuată şi analiza variației seculare a lui, care prezintă şi ea o distribuție geografică determinată. Pe aceeaşi cale şi cu acelaşi grad de certitudine, s-a dovedit că şi acest fenomen este datorit tot unor cauze interne.

Înainte de a relata rezultatele furnizate de analiza armonică sferică pentru partea trecătoare a cîmpului geomagnetic, este bine să precizăm că distincția între cele două categorii de schimbări care o constituie, abia sugerată în cele de mai sus, este bine făcută astăzi, atît ca morfologie cît şi ca fenomenologie a lor. Schimbările tranzitorii ale cîmpului geomagnetic sînt puse în evidență prin înregistrările continue ale elementelor lui, efectuate la observatoarele magnetice. Pe magnetogramele obținute se pot distinge clar, pe de o parte, perioade de „calm magnetic", caracterizate prin variații lente, regulate şi previzibile ale elementelor geomagnetice înregistrate, de aspect cvasisinusoidal, în orice caz periodice, şi, pe de alta, intervale de timp de „agitație magnetică", în care cîmpul prezintă abateri cu caracter neaşteptat, de o formă capricioasă şi cu o distribuție neregulată în timp, cu amplitudini cu totul inegale ale elementelor lui, în raport cu mersul lor în intervale de calm magnetic.

Efectuîndu-se analize armonice sferice atît pentru variațiile calme cît şi pentru perturbațiile geomagnetice — şi unele şi altele avînd o distribuție geografică determinată a parametrilor care le caracterizează, ceea ce a permis calcularea coeficienților numerici din funcțiile sferice reprezentative —, s-a găsit că de astă dată responsabile de producerea fenomenelor sînt atît cauze interne cît şi cauze externe. În ambele cazuri circa două treimi din cîmpul respectiv sînt datorate unor cauze situate în exteriorul suprafeței terestre şi numai restul de o treime are sediul cauzelor în

interiorul ei.

Rezultatele furnizate de analiza armonică sferică sînt de o importanță deosebită, în ciuda caracterului lor destul de general. Fără a aduce vreo informație asupra naturii fizice a cauzelor care produc cîmpul geomagnetic principal sau schimbările geomagnetice tranzitorii, ele arată — bazîndu-se pe caracterul potențial al cîmpului şi pe distribuția geografică a valorilor care îi caracterizează structura şi evoluția — unde urmează să fie căutat mecanismul fizic de producere a lui. Din punctul de vedere pe care l-am adoptat în această scriere, se conturează acum care sînt categoriile de mesaje geomagnetice ale căror descifrări se urmăresc, ce direcții sînt de explorat în scopul efectuării descifrărilor şi de ce natură sînt informațiile ce pot rezulta din aceste operații.

Iată, într-o sumară trecere în revistă, aceste categorii de mesaje, pe care urmează să le examinăm ceva mai de aproape în paginile următoare. Evident, o primă categorie de mesaje transmise de Pămînt prin intermediul cîmpului său magnetic este ansamblul de mesaje legate de cîmpul geomagnetic principal şi de variația lui seculară. Accentul cade aici pe distribuția geografică, fără, însă, ca interesul pentru evoluția în timp să fie absent. În al doilea rînd, vin în vedere mesajele purtate de cîmpul variațiilor calme, cu ponderea de interes în ceea ce îi este specific: evoluția în timp. În fine, privind preponderent tot evoluția în timp dar avînd şi importante particularități în distribuția spațială, într-o ultimă categorie se situează mesajele reprezentate de ansamblul aspectelor atît de variate ale cîmpului perturbațiilor.

Încheind aici această prezentare schematică, vom întreprinde, pe rînd, în cele ce urmează, aducerea cîtorva informații suplimentare, necesare pentru obținerea unei imagini dacă nu complete în orice caz nedistorsionate a ceea ce rezultă din descifrările actuale ale mesajelor magnetice ale Pămîntului. Vom vedea că, pe această cale, se obțin informații variate şi numeroase asupra unui vast domeniu spațial, reprezentat nu numai de întregul Pămînt ci şi de zone ale spațiului interplanetar. Aceste informații aruncă lumină şi asupra mecanismului fizic al unor fenomene din interiorul adînc al planetei noastre, pe de o parte, şi din exteriorul înalt al ei, pe de alta, precum şi asupra relațiilor fizice dintre Pămînt şi Soare.

●

Caracteristica de căpetenie a cîmpului geomagnetic principal este asemănarea distribuției lui spațiale cu aceea a cîmpului unei sfere magnetizate uniform. Pusă în evidență calitativ, prin modelare fizică, încă de Gilbert — care, urmărind orientarea unui mic ac magnetic în diverse puncte de la suprafața Terrellei (sferă de oțel, uniform magnetizată), a explorat spațiul din jurul ei din punctul de vedere al structurii lui de cîmp magnetic —, această asemănare a primit ulterior suportul cantitativ al modelării matematice.

Asimilarea cîmpului geomagnetic principal cu cîmpul sferei uniform magnetizate, echivalent cu acela al unui dipol magnetic — care, la rîndul lui, rezultă din trecerea la limită a cazului unui magnet schematic, adică reprezentat prin doi poli de aceeaşi masă magnetică dar de semne opuse, situaţi la distanţă finită — este valabilă numai într-o primă aproximaţie. Ea este, totuşi, deosebit de utilă atît pentru descrierea principalelor caracteristici ale cîmpului persistent cît şi pentru studiul detaliilor neregulate ale acestui cîmp real, considerate ca abateri de la structura regulată a cîmpului ideal al sferei uniform magnetizate (sau al dipolului magnetic).

Făcîndu-se abstracţie de neregularităţile evidente ale distribuţiei spaţiale a cîmpului geomagnetic principal, se constată că, în linii mari, ea corespunde distribuţiei cîmpului unui dipol care ar fi situat în centrul Pămîntului, avînd un moment magnetic determinat ca mărime şi ca orientare. Axa acestui dipol, numită axă geomagnetică, nu coincide cu axa de rotaţie a Pămîntului ci formează cu ea un unghi de circa 11°½. Punctele în care axa geomagnetică înţeapă suprafaţa sferei prin care se idealizează suprafaţa terestră reprezintă polii geomagnetici, polul geomagnetic boreal B în emisfera nordică şi polul geomagnetic austral A în cea sudică. (Este preferabil să se utilizeze termenii „boreal” şi „austral” pentru desemnarea polilor geomagnetici, căci altfel se poate produce o confuzie, datorită faptului că polul geomagnetic boreal este, din punct de vedere fizic, un pol magnetic sud: spre el se îndreaptă polul nord al acului busolei şi, conform legii lui Coulomb, polii care se atrag sînt de nume contrarii.) Cercul mare al sferei rezultat din intersecţia suprafeţei ei cu un plan normal pe axa geomagnetică AB şi trecînd prin centrul Pămîntului reprezintă ecuatorul geomagnetic.

Ţinînd seama de felul în care sînt definite elementele geomagnetice, prin raportare la sistemul local de referinţă determinat cu ajutorul verticalei locului — pe care, în aproximaţia suprafeţei terestre printr-o sferă, o reprezintă chiar raza sferei —, este evident că la polii geomagnetici cîmpul are direcţia verticală iar la ecuatorul geomagnetic el este orizontal. În ceea ce priveşte intensitatea, valoarea cîmpului total la polii geomagnetici este dublul aceleia de la ecuatorul geomagnetic, în conformitate cu raportul dintre intensităţile cîmpului dipolului magnetic în puncte situate la aceeaşi distanţă de locul în care este aşezat el, puncte de pe axa lui, respectiv din planul normal pe ea. Pe de altă parte, întrucît — aşa cum s-a spus mai înainte — totul se petrece ca şi cînd la polul geomagnetic boreal am avea magnetism sud (situaţia fiind, evident, inversă la celălalt pol geomagnetic), înseamnă că sensul cîmpului este în jos la polul B şi în sus la polul A.

Pe toată suprafaţa terestră, componenta orizontală a cîmpului dipolic este dirijată spre nord, avînd valoarea maximă, egală cu cîmpul total, la ecuatorul geomagnetic, şi anulîndu-se la polii A şi B. În ceea ce priveşte componenta verticală, ea reprezintă, evident, în întregime cîmpul la cei doi poli, fiind pozitivă (dirijată în jos) în punctul B şi negativă (dirijată în sus) în A. Ecuatorul geomagnetic, de-a lungul căruia ea este nulă, îi separă valorile negative din emisfera geomagnetică australă de

cele pozitive din emisfera geomagnetică boreală.

În legătură cu orientarea cîmpului dipolic, abia dacă mai trebuie remarcat că inclinația este nulă la ecuatorul geomagnetic şi creşte în valoare absolută spre polii A şi B, unde atinge, bineînțeles, maximul absolut de 90°. În privința declinației este de semnalat o situație remarcabilă de-a lungul cercului mare al sferei terestre care trece prin polii geomagnetici A şi B (meridian geomagnetic) şi prin cei geografici N şi S: între punctele N şi B ca şi între S şi A declinația este 180° (conform cu definiția ei de a fi unghiul format de direcția nord magnetic cu direcția nord geografic), iar între B şi S, respectiv între A şi N ea este nulă. Se înțelege că şi pentru alte puncte ale suprafeței terestre se poate prevedea mărimea şi semnul declinației ideale (considerată pozitivă atunci cînd este estică, adică pentru o orientare a meridianului magnetic spre est de cel geografic), ținîndu-se seama de amplasarea polilor geomagnetici şi a celor geografici în raport cu poziția punctului considerat, dar operația comportă un grad de detaliere care nu se înscrie în sfera de interes a expunerii de față.

Am început discuția asupra aproximării cîmpului geomagnetic principal prin cîmpul unui dipol magnetic plecînd de la afirmația că asemănarea dintre aceste cîmpuri apare dacă se face abstracție de neregularitățile evidente ale distribuției spațiale ale celui dintîi. Afirmația este făcută în termeni în acelaşi timp vagi (neregularități) şi categorici (evidente) şi lasă deschisă problema felului în care se face abstracție de ceea ce în cîmpul geomagnetic principal nu corespunde cîmpului dipolic. De aceea se recomandă aici cîteva lămuriri suplimentare.

Mai întîi, trebuie spus că funcțiile sferice, despre care a fost vorba mai înainte, sînt constituite dintr-o sumă de termeni, principial în număr infinit, care reprezintă cu atît mai bine cîmpul real, cu tot mai multe detalii şi particularități, cu cît se consideră un număr mai mare de termeni. S-a constatat, însă, că numărul de termeni efectiv necesari pentru o bună reprezentare a cîmpului geomagnetic principal nu este prea mare — vreo 16 ar ajunge —, căci ei descresc relativ repede şi începînd de la un anumit ordin contribuția lor la determinarea valorii cîmpului este mai mică decît eroarea cu care se cunoaşte cîmpul real, aşa că luarea în considerare a termenilor următori este lipsită de sens. Termenii de ordinul I ai desfăşurării în serie de armonice sferice a cîmpului geomagnetic principal (în număr de trei), care definesc ca mărime şi ca orientare dipolul magnetic terestru, reprezintă aproximativ patru cincimi din întregul cîmp. Aceasta arată atît ce înseamnă a face abstracție de neregularități evidente (a neglija termenii de ordin superior din desfăşurarea în serie, în acest caz termenii de ordinul II şi mai mare), cît şi gradul de aproximare a cîmpului geomagnetic principal prin cel dipolic.

Cîmpul dipolic, reprezentînd aşadar 80% din cîmpul principal, este bine determinat prin dubla condiție, aparent inconsistentă intrinsec, de a se face o reprezentare matematică prin funcții armonice sferice, care să corespundă cît mai bine

cazului real, şi de a se reține apoi din ea numai termenii de ordinul I. Aceşti termeni, cu coeficienți numerici rezultați din ansamblul măsurătorilor geomagnetice reale, definesc fără ambiguitate şi cu bună precizie dipolul considerat ca sursă ideală a cîmpului, indicînd atît mărimea momemtului lui magnetic cît şi orientarea axei lui.

Cîmpul „generat” de acest dipol imaginar — totul se petrece ca şi cînd am avea un dipol —, cîmp pentru a cărui desemnare se folosesc în mod echivalent termenii de cîmp geomagnetic regulat, analitic, dipolic, al magnetizării uniforme sau al lui Gauss, conturează precis, cantitativ, noțiunile despre care s-a vorbit mai sus: axă geomagnetică, poli geomagnetici, ecuator geomagnetic, emisfere geomagnetice etc. (Amintim aici că adjectivul „geomagnetic” este utilizat preferențial pentru a desemna noțiunile de acest fel legate de cîmpul ideal, pentru cele corespunzătoare legate de cîmpul real obişnuindu-se a se folosi adjectivul „magnetic”.) Caracterul regulat al cîmpului dipolic este pus în evidență, în particular, de faptul că polii geomagnetici reprezintă extremitățile unui diametru terestru, aşa cum sînt şi polii geografici, şi că ecuatorul geomagnetic este un cerc mare al sferei terestre.

Spre deosebire de acest cîmp ideal, cîmpul geomagnetic real este caracterizat prin cîteva abateri de la regularitățile lui, abateri neglijabile numai într-o primă aproximație. Mai întîi, polii magnetici reali, definiți local prin condiția fizică a verticalității cîmpului şi prin unele particularități ale reprezentării cartografice a lui, despre care va fi vorba mai încolo, nu numai că nu coincid cu polii geomagnetici ideali — de exemplu, polul magnetic real se găseşte în nordul Canadei, la nord-est de țara lui Baffin, pe cînd polul geomagnetic al dipolului este amplasat în vestul Groenlandei, în regiunea strîmtorii Smith — dar nici nu se găsesc la extremitățile unui aceluiaşi diametru terestru: dreapta care uneşte polul magnetic boreal cu polul magnetic austral trece la o distanță de circa 1100 de kilometri de centrul Pămîntului. În al doilea rînd, ecuatorul magnetic real nu este un cerc mare pe sfera de aproximare a suprafeței terestre şi are un traseu cu multe neregularități. Mai mult chiar: dacă el poate fi definit cu ajutorul distribuției valorilor componentei verticale sau ale inclinației, el nu mai poate fi definit, în schimb, folosind pe aceea a valorilor componentei orizontale.

În această ordine de idei, atît pentru justificarea unei asemenea afirmații cît şi pentru a putea indica în termeni mai intuitivi cîteva particularități semnificative ale cîmpului geomagnetic principal real, este poate bine să amintim aici că, pe lîngă reprezentarea matematică prin funcții sferice, cu ajutorul cărora se defineşte — cum am văzut — cîmpul dipolic, mai există o posibilitate de reprezentare sintetică a cîmpului: cea cartografică. Putînd fi utilizată, în principiu, şi pentru cîmpul dipolic, această reprezentare sintetică este recomandată (şi este efectiv aplicată) pentru vizualizarea distribuției geografice a cîmpului real.

Procedeul pe care se bazează reprezentarea cartografică a cîmpului geomagnetic, real sau ideal, foarte eficace ca putere de sintetizare şi aplicabil la orice scară — locală,

regională sau planetară —, constă în a pune în evidență repartiția geografică a valorilor diverselor elemente geomagnetice, într-o anumită regiune sau pe întregul Glob, unind prin linii continue pe harta respectivă sau pe planiglob punctele în care un anumit element geomagnetic are aceleaşi valori. Se obțin, astfel, hărți cu linii izomagnetice (izogone pentru declinația D, izocline pentru inclinația I şi izodiname pentru intensitatea totală a cîmpului geomagnetic T sau pentru diversele ei componente: H, X, Y, Z), la scările reprezentării cartografice corespunzătoare şi cu „echidistanțele" adecvate lor. De obicei, la scară planetară izoliniile sînt reprezentate pe hărți cuprinzînd zonele pînă la circa 80° latitudine; pentru regiunile polare se adaugă porțiuni de planiglob avînd în centru proiecția polului respectiv.

În reprezentarea cartografică, imaginea simplificatoare a cîmpului ideal dipolic are cîteva caracteristici, de altfel uşor de întrevăzut, importante ca termeni de comparație pentru cîmpul real. Ele au jucat un rol care nu este de neglijat în prevederea distribuției geografice a elementelor cîmpului geomagnetic real şi în orientarea organizării măsurării lor precum şi în înțelegerea aspectului reprezentării cartografice a acestei distribuții prin linii izomagnetice.

Mai întîi, pe harta declinației ideale, la scară mondială, apar două izogone $D = 0°$, unind polul geomagnetic boreal B cu polul geografic sud S, respectiv polul geografic nord N cu polul geomagnetic austral A. Cu numele de agone, de o justificare evidentă, aceste izogone speciale, care sînt meridiane geomagnetice, împart suprafața Pămîntului în două emisfere: în cea situată la est de agona BS declinațiile sînt negative (vestice), iar în cealaltă ele sînt pozitive (estice). Se înțelege că, în conformitate cu definiția declinației, atît polii geomagnetici cît şi cei geografici apar ca puncte nodale pe harta mondială a izogonelor, fiind uniți în regiunile polare prin izogone cu valoarea maximă de 180°: B cu N în emisfera boreală şi A cu S în cea australă. În al doilea rînd, hărțile mondiale cu izocline I şi cu izodiname T, H şi Z pun în evidență regularități corespunzînd caracterului de paralele geomagnetice pe care-l au toate aceste izolinii magnetice. În particular, izoclina $I = 0°$ şi izodinamele $T_{minim} = H_{maxim}$, respectiv $Z = 0$ definesc, în perfectă concordanță, ecuatorul geomagnetic, care separă emisfera geomagnetică boreală de cea australă. Elementele I şi Z sînt pozitive în prima regiune şi negative în a doua, pe cînd T şi H sînt, evident, pozitive în orice punct de pe Glob.

Pe hărțile mondiale ale izoclinelor şi ale izodinamelor T, H şi Z polii geomagnetici A şi B apar ca puncte în jurul cărora aceste linii izomagnetice se închid, pe cînd polii geografici nu se manifestă cu nimic, definiția elementelor geomagnetice respective fiind independentă de rotația Pămîntului, adică de axa ei NS. În schimb, ca şi în harta cu izogone — izolinii care converg atît spre A şi B cît şi spre N şi S —, hărțile cu izodiname X şi Y prezintă puncte nodale în cei patru poli A, B, N şi S, aceste elemente geomagnetice fiind proiecții ale cîmpului geomagnetic total pe direcțiile nord şi est, legate de rotația Pămîntului.

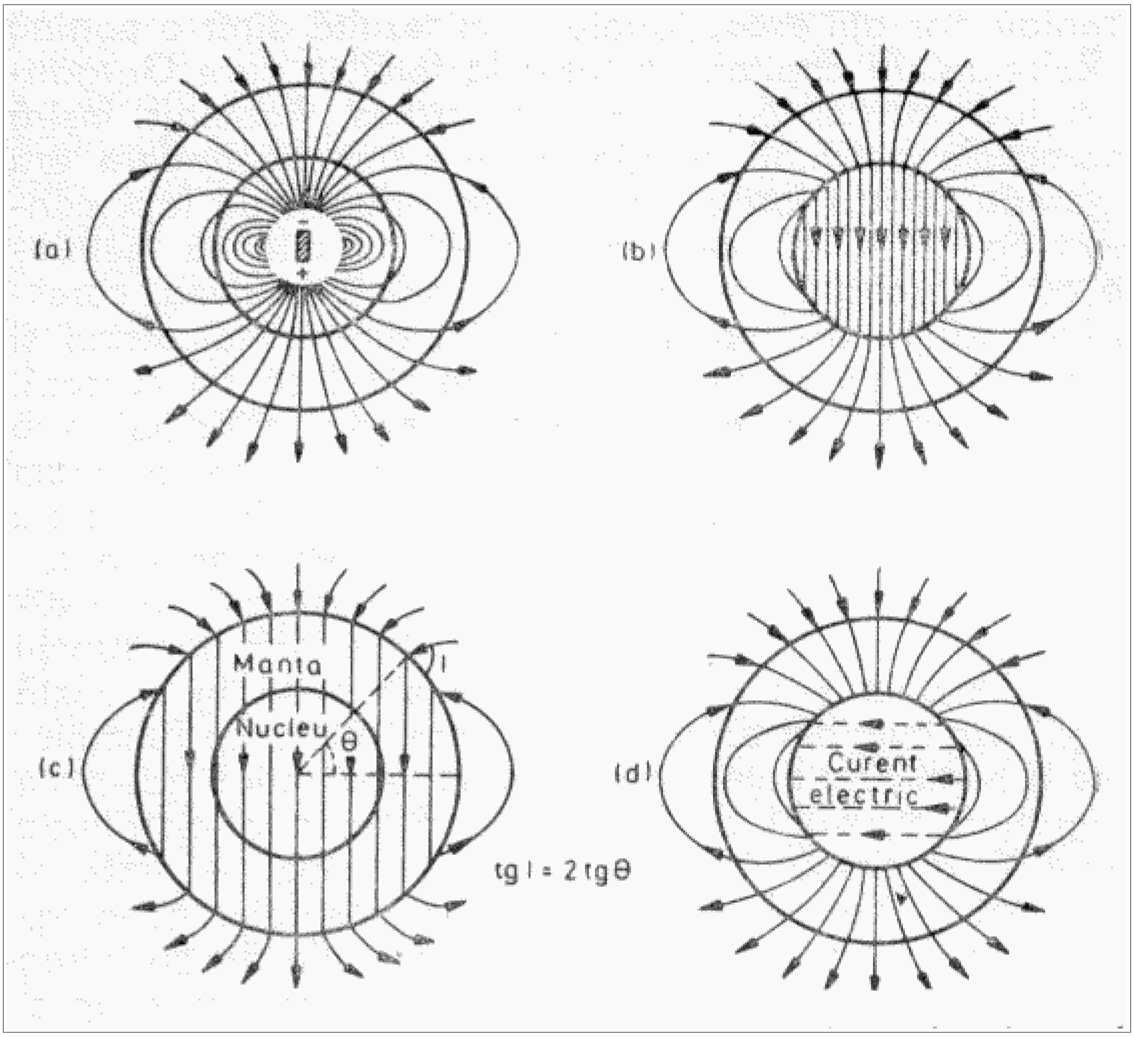
Cîmpul geomagnetic principal real are, în reprezentarea cartografică, o imagine cu multe abateri de la cea ideală, ale cărei principale trăsături au fost schițate în cele ce preced. Deşi există două agone, ele nu prezintă aspectul regulat de „meridiane” geomagnetice: dacă agona BS are un traseu relativ liniştit peste cele două Americi, agona NA prezintă un mers cu totul neregulat peste Lumea veche, punînd în evidență o mare anomalie magnetică continentală. Dintre celelalte abateri, foarte numeroase, ale cîmpului geomagnetic real de la cel dipolic, nu vom mai aminti aici decît pe aceea prezentată de izodinama reală H = maxim care, în loc să înconjure Pămîntul ca ecuator magnetic, se închide în jurul unui punct situat în sud-estul Asiei, punct spre care apare ca deplasat „dipolul” corespunzător cîmpului magnetic real al Pămîntului. Imposibil de definit cu ajutorul componentei orizontale, ecuatorul magnetic este, totuşi, determinat clar de izoclina I = 0° (numită aclină) şi de izodinama Z = 0, fără, însă, ca aceste izolinii coincidente să prezinte mersul regulat al ecuatorului geomagnetic.

Deşi ar mai fi multe de adăugat pentru caracterizarea cîmpului geomagnetic principal real, ne vom limita la cele spuse mai sus, suficiente pentru scoaterea în relief a semnificației acestui cîmp ca mesaj al Pămîntului, purtător de informații asupra interiorului acestuia. Înainte de a discuta acest aspect al problemelor geomagnetice, nu este, poate, lipsit de interes să amintim că existența declinației magnetice şi variațiile ei de la un loc la altul au jucat un rol important în utilizarea busolei ca mijloc de orientare, împrejurare de care Thellier leagă — în citatul din fruntea acestui capitol — notorietatea publică a magnetismului terestru, atîta cîtă este.

Adeseori i se atribuie lui Columb descoperirea faptului că acul busolei nu indică direcția nord adevărată şi că abaterea lui de la această direcție, adică declinația, este diferită în diferite puncte de pe suprafața Pămîntului. Această părere îşi are originea în cîteva observații, formulate destul de confuz, în jurnalul ținut de Columb şi transmise, nu fără deformări, de alți autori. Ea nu pare a fi justificată. Ceea ce rezultă, totuşi, clar din jurnalul lui Columb este faptul că una din busolele cu care el a plecat în a doua sa expediție spre America era construită în aşa fel încît indicatorul de pe roza vînturilor cu care se repera direcția nord să arate spre nordul adevărat. Aceasta înseamnă că acul magnetic era rotit cu unghiul şi în sensul corespunzător pentru eliminarea influenței declinației, din locul în care fusese construită busola, asupra indicației ei, ceea ce se şi întîmplase în acel loc dar nu mai era valabil pentru locuri cu valori foarte diferite ale declinației, cum erau cele din America, spre care se îndrepta Columb.

Astfel de „corectări” ale indicațiilor busolei erau necesare în special pentru valori mari ale declinației şi nu reprezentau operații excepționale, cum rezultă dintr-o pagină din Rabelais. În capitolul privitor la felul în care Gargantua a fost instruit de către Pantocrates, Rabelais înşiră numeroasele activități şi operații a căror deprindere era obligatorie pentru formarea unui om educat, de fapt considerat ca atare, în acele vremuri, şi nu uită să menționeze că Gargantua „regla busola”, adică potrivea,

corespunzător valorii declinației, decalajul dintre indicatorul şi acul busolei, aşa ca orientarea spre nord să fie corectă.



1. Patru descifrări diferite, principial posibile, ale aceluiaşi mesaj: cîmpul geomagnetic principal.

Pentru a examina cîmpul geomagnetic principal sub aspectul de mesaj al Pămîntului şi pentru a încerca, acum după expunerea relativ amănunțită a modului în care acest mesaj este detectat, să schițăm căile de descifrare a lui, vom face în prealabil constatarea că, deşi fără o justificare fizică evidentă, reprezentarea matematică prin funcții armonice sferice s-a dovedit extrem de utilă în această privință. Aşa cum am arătat mai înainte, utilizarea funcțiilor sferice a permis nu numai o reprezentare sintetică adecvată a bogatului material de observație privitor la distribuția geografică a cîmpului geomagnetic principal — material reprezentat de valorile numerice ale elementelor geomagnetice în zeci de mii de puncte de observație de pe întreg Globul — ci şi stabilirea originii interne a acestui cîmp şi chiar determinarea proporției în care el poate fi asimilat cu un cîmp regulat de tip dipolic.

Aceşti primi paşi spre descifrarea mesajului complex reprezentat de cîmpul geomagnetic principal fiind făcuți, urma să se treacă la imaginarea mecanismului fizic

în stare să dea naştere părţii regulate a cîmpului şi la explicarea substratului fenomenologic al părţii neregulate a lui. În ambele privinţe s-au obţinut rezultate interesante şi informaţii preţioase. Totuşi, încă nu se poate vorbi de o descifrare satisfăcatoare a celor două categorii de semnale care intră în alcătuirea mesajului geomagnetic al cîmpului principal: partea dipolică şi partea neregulată, reprezentată de diferenţa dintre cîmpul observat şi cel regulat, dipolic.

Distribuţia regulată în exteriorul Pămîntului a părţii dipolice a cîmpului geomagnetic principal fiind cea descrisă mai înainte şi reprezentată grafic în figura 1 (în exteriorul oricăruia dintre cercurile care reprezintă meridiane geomagnetice), pentru natura fizică a cauzei lui se oferă principial cel puţin patru imagini: (a) prezenţa unui dipol magnetic în centrul Pămîntului, caz în care termenul de „dipolic" ar fi într-adevăr potrivit pentru a desemna cîmpul astfel produs, (b) magnetizarea uniformă a nucleului presupus metalic al Pămîntului, (c) magnetizarea uniformă, evident cu o intensitate mai redusă decît în cazul anterior, a întregului Glob terestru (în ambele cazuri imediat precedente fiind deci adecvată caracterizarea cîmpului produs drept „cîmp al magnetizării uniforme") şi (d) existenţa în nucleul terestru, bun conducător de electricitate, a unor curenţi electrici circulînd de la est spre vest, la limita dintre nucleu şi manta, cu o densitate de curent satisfăcînd o anumită lege de variaţie cu latitidinea.

S-ar putea comenta pe larg fiecare din cele patru descifrări principial posibile ale distribuţiei date a cîmpului geomagnetic din interiorul Pămîntului. Nu o vom face însă, căci aceasta ar depăşi cadrul pe care ni l-am impus prin limitarea descifrărilor mesajelor terestre la cele actuale. De altfel, eliminarea primelor trei posibilităţi este relativ uşoară, pentru motive de incompatibilitate a mecanismului, pe care ele îl sugerează, cu alte informaţii geofizice asupra condiţiilor din interiorul Globului. Nici existenţa unui dipol permanent şi nici magnetizarea uniformă permanentă, fie numai în nucleu fie şi în mantaua terestră, nu se împacă cu temperaturile ridicate din interiorul Pămîntului iar ordinul de mărime a cîmpului ar implica valori ale momentului magnetic al dipolului, respectiv ale intensităţilor de magnetizare, inconsistente cu proprietăţile cunoscute ale materiei, chiar admiţînd o eventuală variaţie a acestor proprietăţi, studiate şi determinate în laborator, în condiţiile termodinamice diferite existente în adîncul planetei noastre.

Rămîne, astfel, în picioare numai a patra modalitate de descifrare, cea care identifică partea regulată a cîmpului geomagnetic principal cu cîmpul produs de curenţi electrici care circulă în nucleu. Limitată la aceşti termeni, descifrarea este nesatisfăcătoare, ea fiind cu totul incompletă. Ea nu face decît să deplaseze partea cifrată a mesajului de la nivelul producerii cîmpului magnetic la acela al generării curenţilor electrici cărora el le este atribuit, ridicînd o problemă deloc mai simplă: care este mecanismul producerii şi menţinerii acestor curenţi? Mai mult, întrucît s-a stabilit că în trecutul Pămîntului au avut loc inversări ale sensului cîmpului, cu păstrarea în

linii mari a direcției lui, se pune şi întrebarea privitoare la mecanismul inversării sensului curenților care îi dau naştere. Este o legătură între aceşti curenți, deci şi între cîmpul magnetic produs de ei, şi rotația terestră? Pe de altă parte, care este cauza variației seculare a cîmpului geomagnetic principal? Apoi, trecînd de la cîmpul dipolic la cel real — mesajul autentic al Pămîntului —, se ridică chestiunea părții neregulate, nedipolice, a lui.

Reprezentat de termenii de ordin superior ordinului I din desfăşurarea în serie de funcții armonice sferice a cîmpului geomagnetic, cîmpul nedipolic, numit şi cîmp neregulat sau cîmp al lui Bauer, a fost considerat, pînă nu demult, ca datorit magnetizării neuniforme a crustei terestre; a şi fost numit, ca atare, cîmp crustal. Cercetări recente, bazate în particular pe măsurători efectuate cu aparate transportate de rachete şi sateliți artificiali ai Pămîntului, au arătat că sediul cauzelor acestui cîmp este situat şi el foarte adînc, probabil tot în nucleu aşa încît tot curenților responsabili de producerea părții dipolice a cîmpului geomagnetic ar trebui să li atribuie şi abaterile de la regularitățile ei care constituie partea nedipolică a cîmpului. De asemenea s-a stabilit că, independent de natura sa fizică, variația seculară geomagnetică este datorită unui mecanism al cărui substrat fenomenologic trebuie să-şi aibă sediul în nucleu sau cel puțin în mantaua inferioară.

Imaginea aceasta, care deja nu mai este simplă, devine şi mai complicată dacă se ține seama de diverse particularități continentale şi regionale ale cîmpului geomagnetic principal şi ale variației lui seculare, în mod evident semnificative şi cunoscute acum nu numai în distribuția lor geografică actuală ci şi într-un vast complex spațio-temporal tetradimensional. Cu alte cuvinte, problema pe care trebuie s-o rezolve descifrarea mesajului geomagnetic reprezentat de cîmpul magnetic principal al Pămîntului este la ora actuală aceea a explicării diverselor caracteristici ale distribuției acestui cîmp în spațiul din jurul Pămîntului, nu numai la suprafața terestră, şi a evoluției lor în timp, nu numai la un moment dat.

Departe de a fi rezolvat această problemă, cercetările întreprinse şi conduse cu asiduitate în scopul elucidării ei au deschis, totuşi, perspective promițătoare. Liniile mari ale mecanismului de producere a cîmpului geomagnetic principal sînt deja schițate şi ceea ce rămîne de făcut — desigur încă mult — este în special să se elaboreze bazele cantitative ale descifrării şi să i se finiseze unele aspecte mai de detaliu, care sînt, totuşi, semnificative pentru înlănțuirea fenomenelor.

În esență, descifrarea, spre a cărei desăvîrşire se merge în prezent, are loc în cadru magnetohidrodinamic, adică producerea cîmpului geomagnetic principal este atribuită unor fenomene legate de deplasarea în cîmp magnetic a unor medii fluide şi cu conductibilitate electrică. Concepțiile actuale, bazate pe cercetări teoretice şi pe experiențe în condiții cel puțin comparabile cu cele din interiorul Globului, oferă perspectiva explicării celor mai multe dintre „constrîngerile” indicate mai înainte,

adică a caracteristicilor şi a principalelor particularități ale distribuției spațio-temporale a cîmpului geomagnetic principal. Ele abordează chiar şi problema, deloc simplă, a explicării deplasărilor polilor magnetici tereştri în raport cu cei de rotație, cu care nu numai că sînt compatibile dar chiar le cer cu necesitate. Apoi, spre deosebire de alte concepții — ca, de exemplu, cele bazate pe existența unor curenți termoelectrici legați de eterogenități de constituție şi de temperatură, la a căror producere şi menținere ar contribui curenții de convecție şi dezintegrările radioactive din interiorul Pămîntului —, concepțiile magnetohidrodinamice furnizează şi o explicație rezonabilă a schimbărilor relativ rapide ale părților nedipolice ale cîmpului geomagnetic principal, atribuindu-le turbulenței din zonele exterioare ale nucleului terestru. Mai mult, încă: aceste concepții sînt compatibile — chiar dacă încă nu conduc la explicații perfect coerente — cu inversări ale polarității cîmpului geomagnetic, în decursul timpului.

Oprindu-ne aici — cam în punctul în care se opresc azi înseşi imaginile calitative ale descifrărilor despre care este vorba —, să amintim, măcar în treacăt, şi nişte prelungiri ale studiului cîmpului geomagnetic principal în complexul spațio-temporal tetradimensional care prezintă importanță nu numai pentru cunoaşterea evoluției acestui cîmp şi a unor caracteristici semnificative ale lui — deci şi pentru descifrările de mesaj amintite mai sus — ci şi pentru problema pe care o vom discuta în ultimul capitol al acestei scrieri: imaginea dinamică a structurii Pămîntului. Este vorba de informațiile ce se obțin cu privire la cîmpul geomagnetic din trecut, pe baza studiului magnetizării unor roci şi chiar a unor obiecte artificiale, ca vase arse sau cărămizi, de vîrstă cunoscută. Cercetările întreprinse, pe această cale, cu privire la cîmpul geomagnetic din trecut — dacă este vorba de trecutul preistoric sau istoric ele se numesc arheomagnetice, iar în cazul trecutului geologic se utilizează termenul de paleomagnetism — se bazează pe premisa că probele studiate s-au magnetizat în condițiile existente în momentul „formării" lor şi că au păstrat nealterată pînă astăzi această magnetizare. Ceea ce se studiază astăzi, pe baza măsurării direcției şi intensității magnetizării acestor probe, reprezentate de roci sau obiecte de pămînt ars, ar corespunde, deci, cîmpului geomagnetic din epoca „formării" probelor. Aceasta înseamnă momentul răcirii sub punctul Curie — temperatura începînd de la care în jos are loc magnetizarea — pentru rocile eruptive, respectiv al cimentării particulelor magnetice care, înainte de depunere, se orientează în direcția cîmpului geomagnetic, în cazul rocilor sedimentare, şi momentul răcirii, după ardere, a obiectelor artificiale amintite.

În cadrul unor ipoteze rezonabile, privind mecanismul şi stabilitatea magnetizării inițiale şi caracterul dipolic al cîmpului geomagnetic principal în tot trecutul Pămîntului, foarte numeroase cercetări paleomagnetice — cele arheomagnetice privesc intervale de timp foarte scurte şi prea apropiate de prezent pentru a avea o însemnătate de ordin gnoseologic, avînd totuşi una de natură metodologică, importantă pentru justificarea ipotezelor admise — au condus la

stabilirea cîtorva fapte de valoare deosebită pentru descifrarea mesajelor geomagnetice. Dintre acestea menționăm, ca avînd semnificație specială la scară planetară: inversarea repetată a polarității cîmpului geomagnetic în trecut, migrarea polilor magnetici şi deriva continentelor.

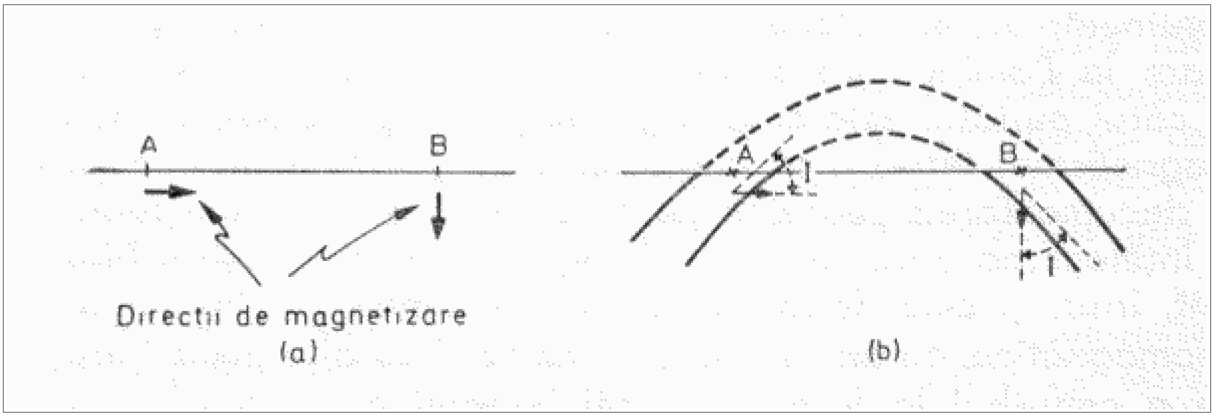
Bine datate, prin determinări de vîrstă relativă şi absolută, numeroase probe de roci, din diverse amplasamente de pe Glob, au arătat, pentru diverse vîrste, magnetizări cînd normale — adică în sensul cîmpului geomagnetic de astăzi —, cînd inverse. Reciproc compatibile atît în cazul determinărilor făcute pe lave solidificate în diverse epoci, pentru timpuri mai recente, cît şi în cazul celor efectuate pe probe de roci sedimentare, de asemenea de diverse vîrste, pentru timpuri îndepărtate, rezultatele paleomagnetice au pus lămurit în evidență generalitatea inversării sensului cîmpului geomagnetic principal, pentru întregul Glob, deci şi inversarea curenților electrici din nucleu responsabili de producerea lui.

Pe de altă parte, studiul paleomagnetic foarte îngrijit al unor roci sedimentare din aceeaşi regiune dar de vîrste diferite, bine cunoscute, a condus — în cadrul imaginii distribuției dipolice a cîmpului —, la amplasări diferite ale polilor magnetici ai Pămîntului, în decursul timpului geologic, deci la migrația polilor. Astfel de determinări făcute pentru roci reprezentînd o lungă serie de vîrste dar provenind dintr-o regiune de dimensiuni relativ reduse — un asemenea caz este, de exemplu, cel al Angliei — au permis chiar trasarea curbei descrise de polul geomagnetic de-a lungul timpului.

În fine, informații obținute cu probe de aceeaşi vîrstă, luate din locuri diferite, împrăştiate pe întregul Glob, cu privire la amplasarea polilor magnetici într-o aceeaşi epocă geologică n-au putut fi puse de acord decît admițîndu-se o deplasare relativă a locurilor respective, situate pe continente diferite, deci postulînd deriva continentală. Semnificative din acest punct de vedere sînt rezultatele determinărilor paleomagnetice efectuate asupra unor probe de roci de aceeaşi vîrstă din America de Nord, din Anglia şi din India, rezultate care devin intrinsec compatibile numai dacă se admite o anumită distribuție geografică relativă a punctelor de luare a probelor, diferită de cea de astăzi.

Pentru ilustrarea unui aspect particular pe care-l prezintă descifrarea unui mesaj paleomagnetic şi pentru aprecierea plauzibilității ipotezei privitoare la stabilitatea magnetizării „paleomagnetice", este schițat în figura 2 un caz special dar real de asemenea magnetizare. Două probe de rocă, bine identificate petrografic şi stratigrafic ca aparținînd aceleiaşi formațiuni geologice, luate în punctele A şi B (figura 2a), prezintă direcții de magnetizare cu totul diferite: orizontală în punctul A şi verticală în B. Aceste direcții sînt imposibil de explicat în cadrul conceptual admis, atît din punctul de vedere al compatibilității lor mutuale cît şi din acela al acordului cu imaginea distribuției dipolice a cîmpului geomagnetic, care ar implica amplasarea, în epoca

magnetizării, la ecuatorul magnetic pentru punctul A şi la polul magnetic boreal pentru punctul B. Punîndu-se, însă, în evidență structura formațiunii din care s-au extras cele două probe şi faptul că ele au fost luate, respectiv, de pe cele două flancuri ale cutei anticlinale prezentate de formațiunea respectivă (figura 2b), enigma a fost lămurită prin constatarea că este vorba de o aceeaşi direcție a magnetizării în epoca în care a avut loc fenomenul: o direcție înclinată în raport cu orizontala locului, dar pentru poziția nedeformată, orizontală, a întregului strat sedimentar, înaintea cutării lui.



2. Descifrarea unui mesaj enigmatic: direcții paleomagnetice aparent discordante.

Exemplul este deosebit de elocvent atît pentru stabilitatea magnetizării, care nu a fost afectată de procesul de cutare, cît şi pentru caracterul dipolic al cîmpului din epoca „formării" rocii, care a produs magnetizarea. Simultan, acest exemplu de descifrare a unui mesaj enigmatic, la prima vedere, sugerează posibilități promițătoare de valorificare pe plan geologic a datelor paleomagnetice.

Încheind această lungă şi, totuşi, incompletă trecere în revistă a problemelor descifrării actuale a mesajului „variat şi complicat" constituit de cîmpul geomagnetic principal şi diversele lui caracteristici şi particularități, vom sublinia, o dată mai mult, bogăția de informații care rezultă din această operație, doar schematic prezentată în cele ce preced: situarea sediului cauzelor care produc acest cîmp în interiorul Pămîntului; precizarea mai de aproape a localizării lor, anume în apropierea discontinuității care separă nucleul terestru de manta; prezența unei conductibilități electrice ridicate în zona corespunzătoare; natura magnetohidrodinamică a fenomenelor responsabile de generarea cîmpului geomagnetic principal; desfăşurarea unor procese asociate, de turbulență, de care sînt legate unele variații relativ rapide ale acestui cîmp; particularități ale mecanismului care provoacă variația seculară şi partea nedipolică a cîmpului; inversări ale cîmpului geomagnetic principal în trecut, cu menținerea orientării axei dipolului imaginar; migrația polilor geomagnetici; deriva continentelor; etc. Dacă ar fi numai aceste informații privitoare la Pămînt care ar rezulta din descifrarea mesajului al cărui purtător este cîmpul geomagnetic principal, şi încă magnetismul terestru ar contribui cu o pondere însemnată la documentarea

geofizică pe care se bazează cunoaşterea şi înțelegerea anatomiei şi fiziologiei planetei noastre. Mai sînt, însă, şi cele două cîmpuri ale schimbărilor tranzitorii geomagnetice, cu alte substraturi fizice şi cu alte posibilități de a contribui la formarea unei imagini coerente despre Pămînt şi viața lui.

•

Pentru aprecierea potențialităților de mesaj al Pămîntului pe care le prezintă cîmpul geomagnetic al variațiilor calme, este indicată o examinare, fie cît de sumară, a principalelor lui caracteristici. O vom face pe baza manifestărilor morfologice ale acestor caracteristici, aşa cum apar ele în înregistrările continue de la observatoarele geomagnetice în intervalele de „calm magnetic"; vom utiliza, pe lîngă aceasta, şi cîteva indicații rezultate din tratamente statistice ale datelor de înregistrare.

Am anticipat deja că starea de calm magnetic nu înseamnă absența de schimbări în cîmpul geomagnetic, ea implică, însă, un caracter lent şi regulat al lor, fapt pentru care au şi fost numite variații calme. Evoluția în timp a oricăruia dintre elementele geomagnetice înregistrate — de regulă D, H şi Z — este redată pe magnetograme, în epocile de calm al cîmpului geomagnetic, printr-o curbă cu un mers monoton, fără particularități neregulate, prezentînd totuşi abateri de la o linie dreaptă. Ceea ce atrage atenția în magnetograma unei zile calme din punct de vedere magnetic este apariția, în cele trei curbe care reprezintă variația elementelor geomagnetice înregistrate, a unei unde de variație, cu aspecte diferite pentru cele trei elemente dar manifestîndu-se numai în porțiunea de zi în care Soarele se găseşte deasupra orizontului la locul de înregistrare. În timpul nopții, curbele au un mers aproape rectiliniu, în direcția efectuării înregistrării, adică paralel cu axa timpului, ceea ce arată cvaziconstanța cîmpului geomagnetic în acest interval, deci absența variațiilor.

Prin intermediul înregistrării elementelor geomagnetice, se pune, astfel, în evidență o variație a cîmpului care, din punct de vedere morfologic, este calmă iar ca desfăşurare în timp este periodică, repetîndu-se în fiecare interval de timp de 24 de ore care reprezintă o zi solară (dar putînd fi mascată de perturbații, în epocile de mare agitație geomagnetică).

Numită variație diurnă solară calmă, ea se recunoaşte de la prima vedere pe magnetograme, în zilele de calm magnetic, reprezentînd singura abatere, în înregistrări, de la monotonia totală a liniilor drepte care ar indica absența oricăror variații. Pe lîngă această variație manifestă, s-a reuşit să se pună în evidență — prin procedee statistice adecvate — existența unei variații cu o amplitudine mult mai mică (circa o zecime din a celei precedente) şi de aceea nedetectabilă direct chiar în intervale de calm magnetic. Ea are perioada de 24 de ore şi 50 de minute, care reprezintă intervalul de timp dintre două treceri succesive ale Lunii la meridianul locului, adică ziua lunară, şi este numită în consecință variație diurnă lunară.

Ambele variații diurne prezintă o variație anuală a amplitudinii lor, mai mare în timpul verii şi mai mică în timpul iernii, cu valori evident intermediare în anotimpurile echinocțiale. În afară de aceasta, simpla succesiune a valorilor medii lunare — adică luate pentru un interval de o lună — ale elementelor geomagnetice pune în evidență, într-un loc dat (de obicei un observator geomagnetic, căci acolo se dispune de datele de observație necesare pentru un asemenea scop), un mers care arată o variație anuală a cîmpului geomagnetic.

Prelucrări statistice folosind în esență metoda mediilor mobile în timp — o mediere efectuată pentru un acelaşi interval de timp, centrat, însă, pe diferite „epoci" — au arătat că mai există o variație care se desfăşoară în paralel cu activitatea solară, cu maxime ale valorilor medii ale elementelor geomagnetice în epocile de maxim de activitate solară şi cu minime în epocile de minim ale acesteia. Fără a fi strict periodice, întrucît ciclul de activitate solară are o durată de 11 ani doar ca valoare medie — putînd fi, în realitate, ceva mai lung sau ceva mai scurt —, această variație este numită variație ciclică undecenală.

Pentru întregirea fizionomiei cîmpului variațiilor calme, trebuie să adăugăm cîteva informații privind unele caracteristici pe care le prezintă aceste variații în funcție de poziția pe Glob a locului de înregistrare. Mai întîi, este evident că, manifestîndu-se exclusiv în perioada de lumină a zilei, ele sînt legate, ca moment de aparitie şi ca desfăşurare ulterioară, de timpul local al amplasamentului observatorului, deci morfologic pot fi considerate ca fiind o funcție de acest timp, cu alte cuvinte de longitudinea locului. În al doilea rînd, pentru o aceeaşi zi, amplitudinea variațiilor geomagnetice calme depinde şi de latitudinea punctului considerat: fără a fi vorba de o lege simplă de variație, amplitudinea scade, în general, cu creşterea latitudinii. În fine, aceste variații calme prezintă şi unele particularități cu totul locale — de exemplu, accentuări relative ale variației componentei verticale a cîmpului sau inversări ale sensului variației ei —, care pun în evidență o influență a structurii mai mult sau mai puțin adînci a subsolului regiunii.

Toate aceste regularități ale distribuției geografice a variațiilor calme au fost stabilite pentru variația diurnă solară, cea de amplitudine mai mare şi oarecum mai reprezentativă. De altfel, celelalte variații calme — cu excepția celei diurne lunare — rezultă din medieri care nu numai că nu înlătură contribuția variației diurne solare dar chiar vădesc evoluția amplitudinii acesteia în timpul unui an, respectiv într-un ciclu de activitate solară.

Toate variațiile geomagnetice calme: diurnă solară, diurnă lunară, anuală şi undecenală sînt desemnate la un loc fie prin termenul de variații calme, care subliniază caracterul manifestării lor, directe sau indirecte, fie prin acela de variații periodice, care atrage atenția asupra regularității distribuției lor în timp. Deşi denumirea de variații periodice este folosită mai frecvent pentru a le indica, ea nu le

desemnează cu exclusivitate, căci — aşa cum vom vedea mai încolo — există schimbări ale cîmpului geomagnetic cu caracter de perturbații, care nu sînt periodice. De aceea este de preferat denumirea de variații geomagnetice calme, respectiv aceea de cîmp geomagnetic al variațiilor calme.

Examinarea cîmpului variațiilor calme sub aspectul de mesaj terestru, purtător de informații asupra fenomenelor care-l generează, arată imediat că avem de a face cu un caz constituind un excelent exemplu de ceea ce înseamnă un mesaj al Pămîntului — în accepțiunea cuvîntului pe care am convenit s-o adoptăm — şi de felul în care elementele lui componente pot fi utilizate pentru a i se efectua descifrarea. De aceea, în loc de a da, pur şi simplu, rezultatele acestei descifrări, vom indica ceva mai pe larg, pentru acest caz, mecanismul şi principalele etape ale obținerii lor.

Pentru început, facem observația că descifrarea desfăşurării în timp a variației diurne solare se simplifică în mod sensibil dacă se utilizează o imagine care nu este o descifrare ci doar o transpunere într-un alt cifru a mesajului corespunzător: imaginea unui uriaş pol magnetic sud care s-ar deplasa, în emisfera boreală, la mare altitudine, de la est spre vest, în medie de-a lungul paralelului de 40°, cu meridianul orei 11. Această operație analoagă cu descrierea cîmpului geomagnetic principal drept cîmpul unui dipol central, prezintă avantajul că, în noul cifru, mesajul devine mai accesibil încercărilor de descifrare.

Constatîndu-se că, în linii mari, totul se petrece în desfăşurarea variațiilor calme ca şi cînd ar exista un asemenea pol magnetic — pentru emisfera australă imaginea corespunzătoare este aceea a unui pol magnetic nord —, într-a doua etapă urmează să se găsească echilibrul fenomenologic al acestor poli magnetici imaginari. Ar fi vorba de o înlănțuire de fenomene compatibile cu condițiile fizice reale din atmosfera înaltă, satisfăcînd, printr-un mecanism fizic plauzibil, caracteristicile principale ale variațiilor calme şi oferind perspectiva explicării cît mai multor particularități ale lor.

Faptul că variațiile geomagnetice calme se manifestă precumpănitor în variația diurnă solară, că aceasta apare numai în intervalul luminat al zilei şi că efectele evoluează odată cu înălțimea Soarelui deasupra orizontului locului furnizează trei prime elemente pentru tentativa de descifrare: intervenția, cu rol preponderent, a unui agent solar, propagarea lui în linie dreaptă de la Soare la Pămînt şi dependența acțiunii lui de unghiul sub care are loc incidența pe Pămînt. Alte indicații prețioase pentru reuşita acestei tentative rezultă din caracteristicile variației diurne lunare: participarea şi a unui agent lunar la producerea fenomenelor care generează variațiile calme şi dependența efectelor lui de poziția reciprocă a celor trei corpuri: Pămîntul, Luna şi Soarele. În fine, şi variația anuală şi undecenală contribuie cu informații utile pentru descifrare: eficiența agentului solar determinant în producerea şi desfăşurarea fenomenelor-substrat variază cu poziția Pămîntului față de Soare în decursul unui an şi cu intensitatea activității solare de-a lungul unui ciclu al acesteia.

Evident, trebuie să se țină seama şi de sugestia dată de analiza armonică sferică şi amintită mai înainte, anume că există şi o parte internă a fenomenelor din a căror înlănțuire rezultă variațiile calme. Această sugestie este confirmată de existența particularităților locale ale variațiilor calme, legate în mod clar de structura şi proprietățile subsolului.

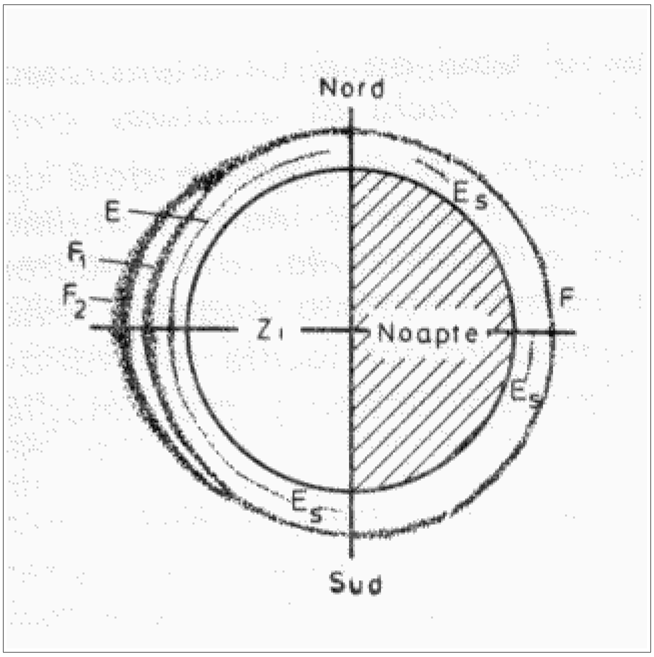
Înainte de a prezenta rezultatul descifrării actuale a mesajului terestru reprezentat de cîmpul variațiilor geomagnetice calme, trebuie precizat că elementelor indicate mai înainte este necesar să li se adauge unul, care în epoca primelor încercări de descifrare — către sfîrşitul secolului trecut — era complet ipotetic dar a cărui realitate este astăzi un fapt pus direct în evidență: existența unor straturi bune conducătoare de electricitate în atmosfera înaltă.

Într-adevăr, polii magnetici imaginați ca mobili în aceste zone şi reprezentînd o modalitate de uşurare a descrierii morfologiei variațiilor calme nu pot avea o existență reală. În schimb, funcțiunea lor poate fi îndeplinită perfect de un sistem de curenți electrici de caracteristici determinate, care ar circula în porțiunile superioare ale atmosferei terestre. Producerea şi menținerea unor asemenea curenți este condiționată, însă, independent de mecanismul de asigurare a forței electromotrice necesare, de buna conductibilitate electrică a mediului, adică a straturilor atmosferei superioare.

Deşi o asemenea concepție era în contradicție flagrantă cu tot ce se ştia atunci despre proprietățile gazelor şi, în particular, cu extrapolarea pentru altitudini mari a proprietăților atmosferei de la suprafața Pămîntului — chiar, sau mai ales, ținînd seama de scăderea densității cu înălțimea —, ea s-a impus. Astfel, pe baze geomagnetice, a fost postulată pentru prima dată existența ionsferei, care ulterior a fost demonstrată de la distanță prin particularități ale propagării undelor de radio, reflectate de ea, şi prin sondaje electromagnetice ad hoc iar, recent, la fața locului, prin determinări efectuate cu ajutorul rachetelor şi al sateliților artificiali ai Pămîntului. La ora actuală, ceea ce se numea, cu trei sferturi de secol în urmă, „stratul Kennelly-Heaviside", imagine ipotetică necesară pentru a se explica nu numai producerea variațiilor geomagnetice calme ci şi transmiterea — realizată de Marconi — a undelor de radio peste Atlantic, este o realitate bine demonstrată, cu o structură complicată.

O imagine suprasimplificată, în scopul descifrării de mesaj care ne interesează, este reprezentată în figura 3. La altitudini cuprinse între circa 100 şi 400 de kilometri gazele care alcătuiesc atmosfera sînt ionizate şi devin, astfel, bune conducătoare de electricitate, prezentînd o stratificare în această zonă a atmosferei înalte, numită ionosferă. În afară de un strat D de la partea inferioară a ionosferei, care nu este reprezentat în figură, există un strat E, continuu în partea luminată a Pămîntului dar prezentînd mari discontinuități în timpul nopții („stratul sporadic" E_s) şi un strat continuu peste tot F, care este afectat de o dedublare în timpul zilei, manifestîndu-se

de fapt ca două straturi F_1 şi F_2. Dacă ar apărea o forță electromotrice, este evident că aceste straturi ar deveni sediul unor curenți electrici, producători de cîmpuri magnetice.



3. Structura schematică a ionosferei.

Cu aceasta am ajuns la prezentarea imaginii coerente a ansamblului de fenomene la care conduce integrarea într-un sistem unitar a tuturor elementelor deduse din caracteristicile morfologice ale variațiilor geomagnetice calme şi a celor adăugate ca postulate necesare, justificate ulterior. Ca descifrare actuală a ansamblului variațiilor calme ale cîmpului geomagnetic se consideră înlănțuirea complexă de fenomene schițată sumar în cele ce urmează.

Sub influența radiațiilor electromagnetice de lungimi de undă mici ale Soarelui — radiații ultraviolete UV şi raze X —, se produce ionizarea gazelor din atmosfera superioară terestră, cu apariția straturilor care constituie ionosfera, bune conducătoare de electricitate. Deplasarea, sub acțiunea de maree exercitată de Soare şi Lună, prin atracție gravitațională a acestor straturi în cîmpul geomagnetic principal, datorit cauzelor interne, provoacă apariția unor forțe electromotrice de inducție, care determină producerea unor curenți electrici în ionosferă, în partea „de zi" a ei. Aceşti curenți, variabili în timp, produc la rîndul lor, prin inducție în subsolul conductor, nişte curenți electrici numiți curenți telurici. Cîmpurile magnetice suprapuse ale sistemelor de curenți electrici din ionosferă şi ale curenților telurici formează ceea ce se înregistrează global ca variații geomagnetice calme.

Este simplu să se identifice, în termeni calitativi, în această imagine complexă — căreia îi corespund suporturi cantitative elaborate în cadrul unor dezvoltări matematice complicate şi subtile — diversele elemente corespunzătoare

caracteristicilor şi particularităţilor din mesajul descifrat. Agentul solar principal, responsabil de producerea variaţiilor calme este reprezentat de radiaţiile solare electromagnetice UV şi X, care se propagă în linie dreaptă de la Soare la Pămînt. Active, astfel, numai în timpul zilei, eficienţa lor în procesul de ionizare pe care-l provoacă în atmosfera înaltă depinde de absorbţia lor acolo şi aceasta depinde de incidenţa radiaţiilor, variabilă, în decursul unei zile, cu înălţimea Soarelui deasupra orizontului şi, în decursul unui an, cu poziţia Pămîntului faţă de Soare. Pe de altă parte, intensitatea radiaţiilor UV şi X emise de Soare este variabilă de-a lungul ciclului de activitate solară, de unde şi variaţiile corespunzătoare ale efectelor lor în cîmpul geomagnetic al variaţiilor calme. În fine, particularităţile locale ale fenomenului sînt legate de conductibilitatea electrică a subsolului în care se induc curenţii telurici, variabili ca densitate de curent — pentru o aceeaşi forţă electromotrice — cu această conductibilitate. Curenţii telurici reprezintă, astfel, treimea din cauzele variaţiilor geomagnetice calme pe care analiza armonică sferică o atribuie interiorului Globului.

Se înţelege că ponderea mare în producerea variaţiilor geomagnetice calme o are Soarele, care intervine atît în procesul determinant al ionizării cît şi în provocarea fenomenului de flux şi reflux al atmosferei superioare, pe cînd rolul Lunii este cu mult mai modest, limitat la intervenţia ei în acest fenomen de maree atmosferice. Pămîntul însuşi participă la acest fenomen prin cîmpul său magnetic principal.

●

Ca şi în cazul pe care am terminat de a-l examina al variaţiilor geomagnetice calme, este recomandabil ca, înainte de a schiţa descifrarea actuală a mesajului terestru al cîmpului perturbaţiilor geomangetice, să facem o scurtă trecere în revistă a principalelor caracteristici morfologice ale fenomenului global pe care-l constituie aceste perturbaţii. Operaţia va trebui să fie completată, şi pentru acest caz, cu aducerea cîtorva informaţii suplimentare. Acestea vor privi, însă, de astă dată, aspecte extrinsece fenomenului terestru propriu-zis, legate de activitatea solară.

Deşi complexă prin aspectele morfologice ale manifestărilor ei ca şi prin conţinutul fenomenologic, noţiunea de perturbaţie geomagnetică este relativ uşor de definit, prin punerea în contrast cu aceea de calm magnetic. Vom caracteriza, astfel, în primul rînd, starea de perturbaţie (sau agitaţie) geomagnetică prin absenţa oricărei regularităţi vizibile în evoluţia în timp a oricăruia dintre elementele geomagnetice urmărite prin înregistrările continue de la observatoarele magnetice.

Deosebiri esenţiale între perturbaţiile şi variaţiile calme ale cîmpului geomagnetic, din punctul de vedere al indicaţiilor asupra substratului fizic al fenomenelor sînt prezentate, însă, în particular, de două caracteristici morfologice: izbucnirea şi desfăşurarea perturbaţiilor în orice interval, luminat sau de întuneric, al duratei de 24 de ore a zilei şi simultaneitatea apariţiei lor pe întreg Globul. Independente, în felul acesta, de longitudine, perturbaţiile geomagnetice prezintă,

totuşi, o dependență, foarte complicată însă, de latitudine, efectele fiind, de astă dată, mai intense la latitudini mari.

O regularitate importantă se remarcă în desfăşurarea în timp a perturbațiilor geomagnetice, în forma lor cu cel mai ridicat grad de agitație, cunoscută sub numele de furtună magnetică: independent de momentul apariției — care se poate situa la orice oră din zi sau din noapte —, în componenta orizontală are loc, mai întîi, brusc sau progresiv, o creştere (faza inițială), urmată de o scădere apreciabilă a valorii acestei componente (faza principală sau de paroxism), după care urmează o revenire lentă spre valoarea ei neperturbată (faza de relaxare sau de „convalescență”). O altă caracteristică semnificativă este creşterea pe care o prezintă componenta verticală a cîmpului geomagnetic în după-amiaza unei zile de perturbație. Este vorba de o manifestare periodică în desfăşurarea perturbațiilor geomagnetice, care se numeşte perturbație diurnă.

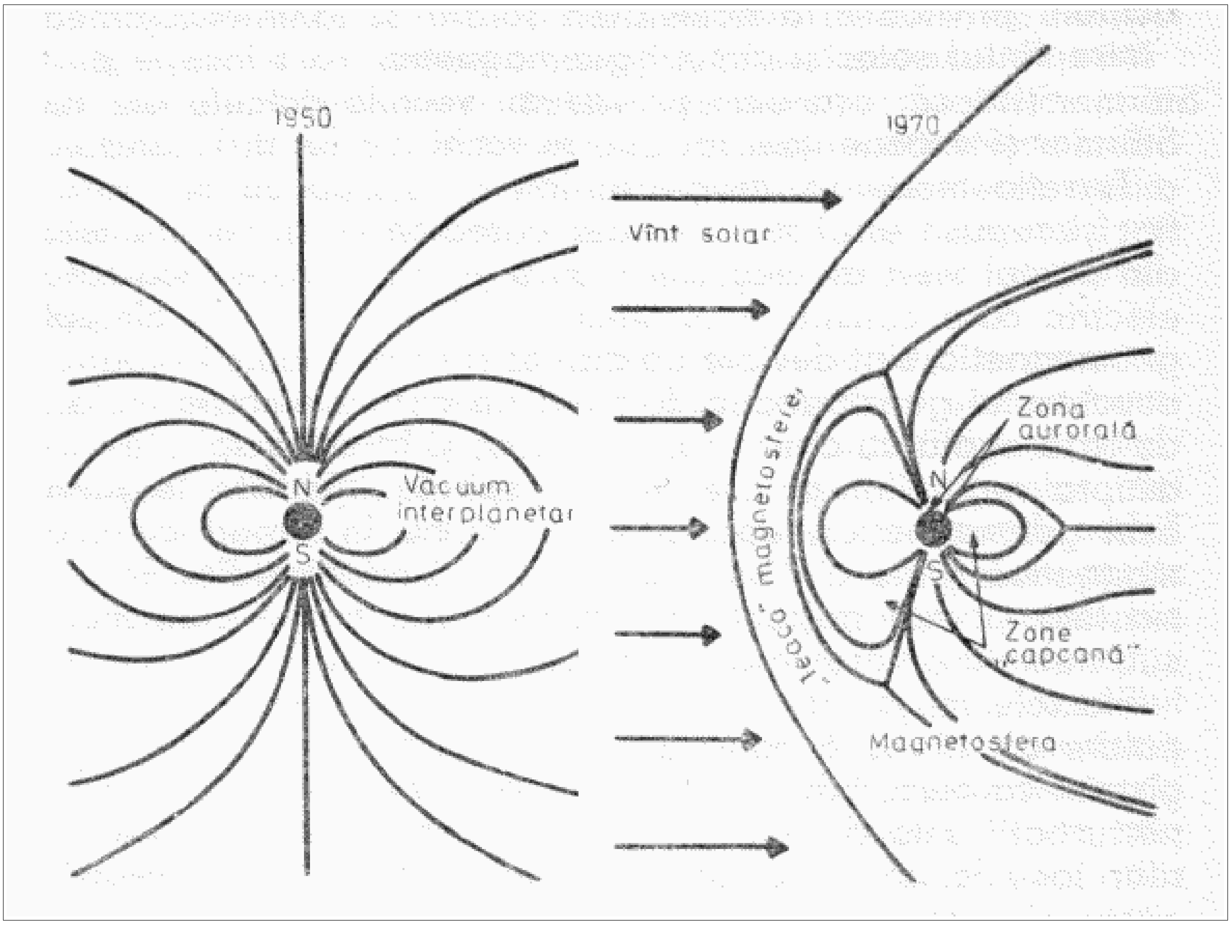
Perioade bine marcate în evoluția în timp a perturbațiilor geomagnetice sînt intervalele de 1 an, reprezentînd durata revoluției terestre, şi de 11 ani, corespunzînd ciclului de activitate solară. Prima nu se manifestă, însă, în intensitatea fenomenelor — cum era cazul pentru variațiile calme — ci numai în numărul lor: în anotimpul geomagnetic echinocțial (format din lunile martie-aprilie şi septembrie-octombrie) perturbațiile sînt sensibil mai numeroase decît în timpul verii geomagnetice (formată din lunile mai, iunie, iulie şi august) sau în timpul iernii geomagnetice (lunile noiembrie, decembrie, ianuarie şi februarie), ambele comparabile din punctul de vedere al frecvenței de apariție a perturbațiilor geomagnetice. În privința perioadei undecenale, trebuie subliniat că ea se recunoaşte atît în numărul de perturbații cît şi în intensitatea lor, variabile în perfect paralelism cu activitatea solară, de-a lungul celor 11 ani ai ciclului acesteia. O perioadă interesantă — care se mai manifestă în evoluția în timp a perturbațiilor geomagnetice, fără a apărea în mersul variațiilor calme — este intervalul de timp de 27 de zile al rotației Soarelui în jurul axei proprii (valoare medie, corespunzătoare latitudinilor heliografice mijlocii): furtunile magnetice prezintă o tendință de repetare, cu intensități descrescînde, după acest interval. Există, în fine, multe particularități în desfăşurarea oricărei perturbații geomagnetice, ca formă de prezentare şi ca amplitudine, unele cu evidente manifestări locale, în acord cu indicațiile analizei armonice sferice, care atribuie şi acestor schimbări în timp ale cîmpului geomagnetic o parte internă a cauzelor care le determină, aşa cum am văzut mai înainte.

Legătura cu fenomenele solare fiind evidentă şi în acest caz, faptul că perturbațiile pot apărea, şi chiar apar frecvent, şi în partea de noapte a Pămîntului arată că trebuie să intervină un agent solar capabil să se propage şi pe traiectorii diferite de o linie dreaptă. Întrucît acest agent a fost identificat a fi radiația corpusculară a Soarelui, vom da aici cele cîteva informații care o privesc, anunțate deja ca extrinsece fenomenului terestru al perturbațiilor geomagnetice.

În urma unor procese a căror natură fizică este numai parțial explicată la ora actuală, Soarele emite în spațiul interplanetar, cu intensități foarte variabile, şi o radiație corpusculară, indicată prescurtat, în mod obişnuit, prin litera K, formată dintr-un flux de atomi şi de particule încărcate electric, ioni — în particular protoni — şi electroni. Pe lîngă neuniformitatea temporală a emisiunii, radiația K este caracterizată şi printr-o marcată neregularitate spațială, datorită repartiției cu totul întîmplătoare a surselor ei pe suprafața Soarelui, direcțiilor corespunzător capricioase în care e dirijată şi înseşi propagării ei intrinsec perturbante.

Ea pleacă din anumite regiuni ale Soarelui (numite de geomagneticieni regiuni M), legate de petele solare sau, poate, chiar reprezentate de acestea. Fluxul de radiații corpusculare, neutru în ansamblu, constituind deci o plasmă — numită şi gaz solar sau, mai frecvent, vînt solar —, poate ajunge la Pămînt, dacă este dirijat spre el. Cîmpul magnetic principal al acestuia exercită o acțiune deviatoare asupra particulelor electric încărcate care alcătuiesc fluxul radiației K. De fapt, interacțiunea dintre cîmpul geomagnetic şi vîntul solar este mult mai complexă — este vorba de o acțiune într-adevăr reciprocă, guvernată de legile magnetohidrodinamicii — şi duce la formarea acelor porțiuni depărtate ale domeniului terestru exterior ionosferei, desemnat mai întîi ca exosferă şi apoi, ținîndu-se seama de rolul determinant pe care-l are cîmpul magnetic în desfăşurarea fenomenelor ce au loc acolo, cu numele de magnetosferă. Abătîndu-se cu mult mai mult decît ionosfera — destul de asimetrică şi ea — de la simetria generală a celorlalte geosfere, care, cu excepția hidrosferei şi a biosferei, sînt practic sfere concentrice, magnetosfera nu-şi justifică deloc a doua jumătate a numelui.

Magnetosfera are forma indicată în figura 4, în care sînt reprezentate, în paralel, concepțiile despre distribuția spațială a cîmpului geomagnetic extern, valabile pentru lumea ştiințifică în epocile 1950 şi 1970. În opoziție cu simetria perfectă a distribuției dipolice a acestui cîmp, în ipoteza absenței complete a materiei în spațiul interplanetar, caracterizat ca vacuum, imagine admisă acum un sfert de secol (partea din stînga a figurii 4), se situează imaginea de azi, complet asimetrică, în care cîmpul geomagnetic apare ca distorsionat sub influența vîntului solar şi limitat la zona care formează magnetosfera, în interiorul „tecii” acesteia.



4. Imaginile de ieri şi de azi ale cîmpului geomagnetic extern.

De fapt, structura magnetosferei prezintă o complicaţie mult mai mare. Pentru problemele legate de perturbaţiile geomagnetice, examinate aici sub aspectul de mesaj al Pămîntului, care urmează să fie descifrat doar în termeni calitativi, informaţiile date pînă acum sînt, totuşi, suficiente, furnizînd punctele de sprijin mai importante. Mai este, poate, bine să semnalăm şi existenţa zonei aurorale, care coboară pînă în ionosfera inferioară, şi a regiunii-capcană, în care sînt capturate particule ale vîntului solar, constituind aşa-numitele centuri de radiaţie ale Pămîntului sau zonele lui Van Allen.

Să trecem acum la prezentarea imaginii care rezultă din descifrarea mesajului terestru al cîmpului perturbaţiillor magnetice, în cadrul fixat de morfologia lor şi de cunoştinţele actuale privitoare la activitatea solară şi la interacţiunea dintre vîntul solar şi cîmpul geomagnetic. Vom începe prin a constata că, aşa cum prevedeau vechile calcule ale lui Störmer şi experienţele tot atît de vechi ale lui Birkeland cu o Terrella modernă, introdusă într-un spaţiu cu aer rarefiat şi supusă unui flux de raze catodice — unele şi altele din primul sfert al secolului nostru —, particulele încărcate electric care constituie plasma solară, ajungînd în cîmpul geomagnetic, sînt deviate de acesta şi se distribuie în planul ecuatorului geomagnetic, formînd un curent electric inelar, de rază egală cu cîteva raze terestre, şi în două spirale deasupra regiunilor polare. Aceste spirale, răsucite în jurul axei geomagnetice, deci dipolice, şi nu în raport

cu axa magnetică reală a Pămîntului, pătrund relativ adînc în atmosferă şi dau naştere fenomenelor luminoase cunoscute sub numele de aurore polare (boreale şi australe).

Efectele magnetice ale curentului inelar şi ale spiralelor polare constituie o parte a ceea ce observăm noi în înregistrări ca perturbații geomagnetice. O altă parte a acestor perturbații este datorită modificării conductibilității straturilor ionosferice de către particulele încărcate cu electricitate pătrunse în ele, ceea ce duce la deformarea sistemelor de curenți care provoacă variațiile calme diurne. Fenomene de natură magnetohidrodinamică — constînd în oscilații ale plasmei care capătă o rigiditate transversală față de liniile de cîmp ale cîmpului geomagnetic — se adaugă celorlalte categorii de procese. Inducția de curenți electrici în Pămînt, sub influența curenților variabili responsabili de producerea perturbațiilor — alții decît cei care produc variațiile geomagnetice calme — complică şi ea fenomenele, cu efecte locale, determinate de conductibilitatea subsolului. Un mecanism imaginat în urma descoperirii centurilor de radiații din jurul Pămîntului atribuie, în fine, cel puțin o parte din perturbațiile geomagnetice efectelor magnetice ale particulelor solare care, pătrunzînd în cîmpul geomagnetic, sînt capturate de acesta şi obligate să circule în zonele de radiație.

Din această schemă a substratului fizic al perturbațiilor geomagnetice, este de reținut complicația aproape inextricabilă a fenomenelor, în care neuniformitatea în timp a emisiunii radiației corpusculare solare este asociată cu neregularitățile distribuției ei spațiale, ca urmare a repartiției regiunilor M pe suprafața Soarelui. În cadrul acestei complicații — accentuate încă şi mai mult de efectele rotației solare asupra orientării în spațiul interplanetar a fluxurilor de radiații K precum şi de efectele deviatoare ale cîmpului magnetic principal al Pămîntului asupra particulelor încărcate electric care o constituie — trebuie considerat mecanismul suprasimplificat, prezentat mai sus, căruia i se atribuie originea fizică a cîmpului geomagnetic al perturbațiilor.

Informațiile furnizate de descifrarea mesajului terestru reprezentat de acest cîmp permit cîteva precizări privind fenomenele responsabile de generarea perturbațiilor al căror aspect morfologic a fost schițat mai înainte. Fazelor mai importante ale unei furtuni magnetice le corespund, astfel, luarea de contact a vîntului solar cu cîmpul geomagnetic principal — care poate avea caracterul brusc al unui şoc sau poate fi progresivă — (faza inițială), formarea curentului inelar în planul ecuatorului geomagnetic şi circularea lui în acest plan cu intensitatea maximă (faza de paroxism), respectiv atenuarea treptată a curentului inelar (faza de convalescență). Se înțelege, apoi, că perturbația diurnă este legată de creşterea conductibilității electrice a straturilor ionosferice, a căror densitate de ioni este mărită prin adăugarea, la cei produşi de radiațiile UV şi X, a celor reprezentați de particulele încărcate din radiația K. Pe de altă parte, tendința de repetare a furtunilor magnetice după 27 de zile se explică şi ea, în cadrul acestei descifrări a mesajului general al perturbațiilor geomagnetice: repetarea unei furtuni magnetice corespunde revenirii, după o rotație a

Soarelui în jurul axei sale, a unor regiuni M în poziția favorabilă bombardării Pămîntului cu radiație K în stare să provoace furtuna, în general cu o intensitate mai redusă decît a celei anterioare, datorită slăbirii continue a emisiunii corpusculare. În fine, particularitățile locale ale perturbațiilor geomagnetice sînt corespondentele magnetice ale perturbațiilor curenților telurici, induşi în subsolul cu conductibilitate electrică variabilă de la o regiune la alta.

Fără îndoială, imaginea extrem de schematică prezentată, lipsită şi de suportul cantitativ al teoriei matematice a fenomenelor, lasă nelămurite multe dintre aspectele mai de detaliu ale numeroaselor probleme legate de cîmpul geomagnetic al perturbațiilor. Liniile generale, însă, ale descifrării actuale a mesajului Pămîntului pe care îl constituie acest cîmp, se pot recunoaşte din prezentarea făcută, precum şi natura şi ponderea gnoseologică a informațiilor privitoare la planeta noastră, care rezultă din această descifrare.

•

Recunoscînd limitarea substanțială a celor trecute în revistă, nu numai în expunerea de pe urmă, privind cîmpul geomagnetic al perturbațiilor, dar în întreg acest capitol, în general, este recomandabil să subliniem şi absența completă din prezentarea noastră a unor informații care se pot lega de problemele geomagnetice: date cu privire la fenomenele geoelectrice — n-am amintit decît cu totul în treacăt curenții telurici —, utilizarea fenomenelor geomagnetice la studiul structurii subsolului (prospecțiunile magnetice legate de anomaliile locale ale cîmpului principal ca şi tehnicile sondajelor geomagnetice şi magnetotelurice, care utilizează cîmpurile variațiilor calme şi perturbațiilor), aplicații ale studiului ionosferei şi magnetosferei în domeniul telecomunicațiilor, paralelizarea ansamblului fenomenelor legate de activitatea solară: furtuni geomagnetice, perturbații ionosferice, agitații în curenții telurici, apariții de aurore polare, dispariții în recepțiile radiofonice pe unde scurte, etc. Explicația este că, pe lîngă volumul limitat impus expunerii noastre, valoarea relativ redusă a informațiilor respective ca mesaje ale Pămîntului, la scara la care am considerat noi fenomenele, nu ne îndemna la cuprinderea lor în acest cadru.

Chiar cu aceste lacune — pe care le semnalăm şi pentru a sublinia amploarea domeniului geomagnetismului, pe lîngă existența unor prelungiri care merg uneori foarte departe, în direcții cu totul neaşteptate —, expunerea noastră, polarizată în jurul aspectelor pe care le ia cîmpul geomagnetic, prin părțile lui componente, ca mesaj terestru, este în măsură să dea o idee despre caracterul acestui mesaj şi despre căile descifrării lui. Descifrarea însăşi, prezentată în liniile ei esențiale şi cu principalele rezultate la care a condus pînă la ora actuală contribuie şi ea la scoaterea în relief a ceea ce anunțau cuvintele lui Thellier puse în fruntea acestui capitol, cu privire la cîmpul geomagnetic: caracter complicat şi enigmatic, varietate în manifestări.

La aceste caracteristici, noi am adăuga, cu titlul de încheiere a capitolului, şi

vastitatea impresionantă a domeniului spațial în care se extind fenomenele legate de magnetismul terestru: de la nucleul Pămîntului (unde descifrarea actuală a mesajului complex al cîmpului geomagnetic principal situează sursa acestui cîmp) pînă la ionosfera şi magnetosfera planetei noastre (unde ultimele descifrări ale celorlalte două mesaje, nu mai puțin complexe, ale variațiilor calme şi ale perturbațiilor geomagnetice arată că se găsesc sediile cauzelor care produc cîmpurile respective).

4. RADIOACTIVITATEA TERESTRĂ

„Curînd după descoperirea radioactivității de către H. Becquerel şi M. Curie se recunoaşte omniprezența substanțelor radioactive în toate mediile geofizice. Aceasta conduce repede la întreprinderea sistematică de cercetări şi de experiențe în activitatea geofizică şi oferă noi soluții eficiente pentru numeroase probleme individuale."
H. ISRAËL

„Dar vremea? Unde-i vremea? O caut şi e lipsă?"
ION PILLAT

Asocierea acestor două citate aici, la început de capitol, poate să fie întrucîtva derutantă, la prima vedere, şi ca simplă alăturare şi prin funcțiunea comună pe care însuşi acest fapt pare a le-o atribui. Dar a pune alături nu înseamnă totdeauna a paraleliza şi atribuirea unei aceleiaşi destinații nu implică neapărat utilizarea aceloraşi căi pentru a ajunge la ea.

Ca atare, informația cuprinzătoare, tonalitatea majoră afirmativă şi expresia calmă a cuvintelor omului de ştiință pot să nu fie chiar atît de antinomice, după trecerea primului moment, cu sugestia restrînsă, atmosfera interogativ-negativă şi tonul agitat din versul poetului, în rolul pe care cele două citate îl au aici de a pregăti trecerea în revistă a unei categorii deosebite de mesaje terestre. Sînt mesajele fizice pe care Pămîntul ni le trimite fie prin însăşi emisiunea de particule şi de unde produse în procesele de dezintegrare radioactivă, fie prin compoziția substanțelor care au rezultat din aceste fenomene.

De altfel, structura acestui capitol, de dimensiuni mai reduse decît ale celor care l-au precedat, privitoare la cîmpurile naturale ale Pămîntului, reflectă oarecum — la altă scară, desigur — imaginea sugerată, împreună, de aprecierea obiectivă asupra georadioactivității, făcută de Israël, şi de întrebarea în termeni subiectivi, a lui Pillat, privind „vremea". Va fi, astfel, vorba — în cele ce urmează — de mesajele radioactive, directe sau indirecte, ale planetei noastre şi, în particular, de acelea care permit „căutarea" timpului, cu rezultatul punerii în evidență nu a lipsei ci a prezenței lui, sub forme de trecut geologic, în vîrsta rocilor şi a Pămîntului.

•

Pentru conturarea cadrului în care vom face prezentarea mesajelor terestre din această categorie, se oferă un punct de plecare natural şi comod, reprezentat de faptul că însăşi descoperirea fenomenului radioactivității s-a făcut în context geonomic. Eliberarea spontană de energie, desemnată global prin termenul de radioactivitate, a fost pusă în evidență, mai întîi, în cazul unor săruri de uraniu, apoi pentru diverse

minerale conținînd acest element. Ea s-a manifestat macroscopic prin impresionarea unei plăci fotografice, fără un contact optic direct între emulsia ei şi sărurile sau mineralele respective. Se poate vorbi, astfel, de adevărate „autoradiograme”, cu caracter de prime aplicații ale radioactivității în domeniul geoştiințelor, înainte de identificarea ei ca fenomen nuclear.

Rezultatele sistematic negative ale tuturor încercărilor de a se influența, din exterior, prin diverşi agenți fizici sau chimici, procesele radioactive au demonstrat, cu toată claritatea, că sediul cauzelor care le provoacă este în interiorul adînc al atomului, adică în nucleu. De acolo pleacă atît radiațiile de natură corpusculară „alfa” şi „beta” cît şi cele de natură ondulatorie, electromagnetică, „gama”, toate purtătoare de energie şi formînd în ansamblu emisiunea radioactivă, produs al dezintegrării nucleului atomic.

Dezintegrarea radioactivă se desfăşoară după bine-cunoscutele legi de descendență, care au ca obiect mecanismul dezintegrării şi caracterizarea atomului rezultat din acest proces, în raport cu atomul din care provine. În ceea ce priveşte desfăşurarea în timp a fenomenelor, ea este guvernată de legi statistice bine stabilite, deosebit de importante pentru georadioactivitate. Ambele categorii de legi ale radioactivității se aplică tuturor proceselor de dezintegrare, prezentate de atomi aparținînd aşa-numitelor familii radioactive naturale (familia uraniului sau radiului, familia actiniului şi familia toriului) sau de alți atomi, care nu se încadrează în familii cu proprietăți radioactive, cum sînt anumiți atomi de carbon, de potasiu sau de rubidiu.

Legile de descendență se formulează uşor dacă se ține seama de natura radiației emise în procesul căruia i se aplică, pe de o parte, şi de caracteristica atomului care este determinantă pentru fixarea locului lui în tabloul clasificării periodice a elementelor, al lui Mendeleev, pe de alta. Pentru scopurile noastre, aici, este de ajuns să amintim că particulele „alfa” sînt atomi de heliu biionizați, adică au o masă de patru unități atomice şi două sarcini electrice elementare pozitive, iar particulele „beta” sînt electroni, adică au o masă neglijabilă şi o sarcină electrică elementară negativă, pe cînd radiațiile „gama” sînt formate din fotoni, fără masă — la scara la care se consideră fenomenele în acest context — şi fără sarcini electrice. Pe de altă parte, trebuie să amintim că locul unui atom în tabloul lui Mendeleev este fixat de numărul lui atomic, reprezentat de numărul de sarcini electrice elementare pozitive ale nucleului, număr evident egal cu acela al electronilor de pe orbitele din jurul nucleului, ceea ce asigură neutralitatea electrică a atomului, considerat în ansamblu.

Enunțul legilor de descendență este, acum, simplu, ținînd seama că ele trebuie să arate cum se schimbă masa atomică şi locul unui element în tabloul lui Mendeleev, în urma dezintegrării radioactive. Dacă dezintegrarea unui atom se face prim emisiunea unei particule „alfa”, aceasta conduce la apariția unui descendent care, conform celor

spuse mai sus, cu privire la la masa şi sarcina electrică a particulei „alfa”, va avea o masă atomică mai mică cu patru unități şi se va deplasa cu două locuri spre stînga (adică spre numere atomice mai mici) în tabloul de clasificare a elementelor. În cazul unei dezintegrări prin emisiune „beta”, descendentul va avea, practic, aceeaşi masă atomică pe care o avea elementul-părinte dar se va situa, în tabloul lui Mendeleev, în căsuța vecină de la dreapta aceleia a atomului din care provine (număr atomic mai mare cu o unitate). Emisiunea de radiații „gama” nu produce, însă, schimbări nici în masa atomică, nici în numărul de ordine al elementului în tabloul lui Mendeleev, efectul ei fiind numai modificarea energiei interne a nucleului atomic.

Se înțelege că dacă, de exemplu, în cadrul unei familii radioactive, au loc, succesiv, o dezintegrare „alfa” şi două dezintegrări „beta”, după aceste procese elementul descendent se găseşte în acelaşi loc în tabloul lui Mendeleev în care se găsea elementul radioactiv inițial, ca avînd aceeaşi sarcină electrică pozitivă a nucleului şi acelaşi număr de electroni pe orbitele din jurul lui (deci şi aceleaşi proprietăți fizice şi chimice, în general). Masa lui atomică este, însă, mai mică cu patru unități. Asemenea atomi, cu mase atomice diferite dar cu acelaşi număr de ordine în clasificarea elementelor, sînt numiți, cum se ştie, izotopi, întrucît ocupă acelaşi loc în tabloul lui Mendeleev.

Izotopii prezintă o importanță deosebită şi pentru ştiințele Pămîntului. Compoziția izotopică a anumitor elemente constituie un mesaj radioactiv de prim ordin al Pămîntului. Repartiția relativă a diverşilor izotopi, fie în produsul final al unui proces de dezintegrare, fie în anumite combinații chimice din alcătuirea unor roci sau a unor părți din diverse fosile, furnizează informații de mare valoare pentru determinările de vîrste ale rocilor, prin aşa-numita datare radioactivă absolută, respectiv pentru condițiile în care au avut loc anumite fenomene, în particular în privința temperaturii de formare a unor combinații chimice din roci şi din fosile.

Pentru importanța pe care o prezintă în cadrul determinărilor de vîrste ale rocilor, este cazul să menționăm aici un proces radioactiv întrucîtva particular: aşa-numita dezintegrare prin captură. Nucleele unor atomi (cum este, de exemplu, cazul unui anumit izotop al potasiului) „capturează”, însuşindu-şi, unul dintre electronii de pe prima orbită exterioară, ceea ce echivalează cu dispariția unei sarcini electrice elementare pozitive din nucleu. Legea de deplasare corespunzătoare indică pentru acest caz o deplasare spre stînga cu un loc, în tabloul lui Mendeleev, fără variație de masă atomică. Acest proces, reprezentînd oarecum inversul unei emisiuni „beta”, este însoțit de obicei de emisiunea unui foton, dar nu în domeniul radiațiilor „gama” ci în acela al razelor X. Să mai adăugăm că potasiul radioactiv prezintă atît dezintegrarea prin captură — care duce la formarea de argon, fenomenul utilizat în determinările de vîrste prin metoda „potasiu/argon” — cît şi dezintegrarea „beta”, din care rezultă calciu.

Trecînd acum la legile statistice care guvernează toate fenomenele radioactive, inclusiv captura, vom anticipa că ele constituie valoroase instrumente de investigație în domeniul descifrărilor mesajelor radioactive ale Pămîntului, în particular prin datele pe care le furnizează privitor la rapiditatea, respectiv — mai bine, poate — încetineala desfăşurării în timp, a proceselor de dezintegrare pentru diferitele elemente radioactive. Aceste procese au un caracter întîmplător dar, producîndu-se pentru o populație extrem de numeroasă de atomi, sînt supuse legilor numerelor mari ale statisticii. În consecință, plecîndu-se de la ipoteza perfect plauzibilă, independentă de mecanismul fizic al dezintegrării, că numărul de dezintegrări produse într-un anumit interval de timp este proporțional cu numărul de atomi prezenți şi cu lungimea acestui interval de timp, se deduce legea exponențială a descreşterii în timp a numărului de atomi care se dezintegrează. Constanta de proporționalitate din legea elementară este specifică elementului respectiv şi se numeşte constanta de dezintegrare a lui. Cunoaşterea acestui parametru caracteristic pentru fiecare specie de atomi radioactivi — asigurată cu o precizie care a fost mereu îmbunătățită de determinările fizicii — permite studiul desfăşurării în timp a fenomenului, cu importante aplicații în geoştiințe.

O mărime mai intuitivă decît constanta de dezintegrare este inversul ei, care reprezintă aşa-numita viață medie a atomilor radioactivi. Încă mai elocventă — în special în vederea descrierii pentru nespecialişti a desfăşurării în timp a proceselor de dezintegrare radioactivă — este un al treilea parametru al legilor statistice ale radioactivității: timpul de înjumătățire. În relații simple, bine determinate, cu constanta de dezintegrare şi cu viața medie, timpul de înjumătățire reprezintă — cum arată şi termenul însuşi — intervalul de timp după care din numărrul de atomi radioactivi, prezenți la un moment dat, au mai rămas nedezintegrați doar jumătate. Se înțelege că acest interval este lung pentru procesele lente şi scurt pentru cele rapide.

Astfel, pentru a cita exemple importante pentru problemele care ne interesează aici, timpul de înjumătățire este de aproape 50 de miliarde de ani pentru dezintegrarea foarte înceată a izotopului radioactiv al rubidiului dar de numai 5730 de ani pentru procesul relativ rapid de dezintegrare a izotopului radioactiv al carbonului. Chiar pentru dezintegrări din sînul aceleiaşi familii, ordinele de mărime ale acestui parametru prezintă variații extrem de mari. Să amintim numai că primele dezintegrări din familia uraniului au următoarele timpuri de înjumătățire: patru miliarde şi jumătate de ani pentru tranziția uraniului în uraniu X_1, apoi ceva mai mult de 24 de zile pentru dezintegrarea acestuia, care dă atît uraniu X_2 cît şi uraniu Z, pentru ca aceştia să se dezintegreze cu timpuri de înjumătățire de aproape 7 ore, respectiv de ceva mai mult de un minut. Interesant este şi cazul celor trei produşi în stare gazoasă („emanații”) din familiile radioactive naturale: radonul, toronul şi actinonul, cu timpurile de înjumătățire respective de aproape patru zile, aproape un minut şi ceva mai puțin de patru secunde.

Existența unor valori atît de diferite pentru acest important parametru de caracterizare cantitativă a procesului de dezintegrare are o importanță evidentă. Între anumite limite şi în funcție de frecvența de apariție a fenomenelor corespunzătoare în mediile geologice — şi depinzînd, evident, şi de satisfacerea anumitor condiții privind posibilitatea de efectuare a măsurătorilor cu precizia necesară, în acord cu premisele ce stau la baza tehnicii metrologice respective —, se poate face o alegere a tipului de dezintegrare care este indicat să fie utilizat într-un anumit scop, după ordinul de mărime al timpului de înjumătățire corespunzător.

●

Trecînd acum, propriu-zis, la mesajele radioactive ale Pămîntului, vom începe examinarea lor, a modalității de a le descifra şi a informațiilor pe care le furnizează, cu cea mai importantă categorie: dezintegrările radioactive naturale ale atomilor care intră în alcătuirea Pămîntului. Se înțelege că este necesar ca aceşti atomi să aibă cel puțin o largă răspîndire în roci — dacă nu şi să intre într-o proporție ridicată în alcătuirea lor —, pentru ca detectarea şi descifrarea mesajelor pe care le constituie dezintegrările respective să fie, într-adevăr, semnificative.

Detectarea şi identificarea acestor mesaje se face prin tehnici în acelaşi timp complicate şi delicate iar descifrarea lor presupune cunoscute, cu o bună precizie, constantele de dezintegrare, respectiv timpurile de înjumătățire sau viețile medii ale elementelor care vin în vedere. Mai mult decît în cazul altor mesaje ale Pămîntului, sînt evidente interdependența şi alternanța etapelor operațiilor respective, care lasă impresia unei cvasisimultaneități a lor şi fac ca o încercare de a separa cu totul descifrarea de detectare să pară arbitrară.

Elaborate în variate forme şi aplicate cu multe adaptări specifice, de la caz la caz — în special după categoria de atomi radioactivi utilizați —, tehnicile de descifrare a mesajelor radioactive ale Pămîntului în scopul datării absolute a rocilor şi chiar pentru determinarea vîrstei absolute a Pămîntului au o fundamentare conceptuală simplă şi cvaziunitară. În primul rînd este de avut în vedere că dacă „la început” (aceasta înseamnă a fixa momentul de la care se pleacă în considerarea vîrstei rocii sau a Pămîntului) n-au existat decît părinții celor trei familii radioactive naturale şi dacă se cunoaşte ritmul de dezintegrare al fiecăruia, datarea se poate face pe baza determinării raporturilor în care se găsesc în produsul final al dezintegrării cei trei descendenți stabili (ceea ce înseamnă a fixa cealaltă extremitate a intervalului de timp care reprezintă vîrsta).

De fapt, nu este necesar să se studieze cele trei procese de dezintegrare, este de ajuns să se considere numai două. Produsul final al dezintegrărilor pentru toate cele trei familii de elemente radioactive naturale este plumbul, în fiecare caz fiind vorba de un anumit izotop stabil al lui. Lucrurile sînt, de fapt, mai complicate, ținîndu-se seama de întregul lanț de dezintegrări intermediare, dar important este că, teoretic, se poate

calcula în ce raporturi relative trebuie să se găsească izotopii respectivi după un anumit interval de timp sau — problemă inversă, cu mult mai importantă — ce interval de timp a trebuit să treacă pentru ca izotopii să se prezinte în proporțiile constatate experimental.

Dacă este vorba de un singur element radioactiv care se dezintegrează trecînd într-un singur descendent stabil (cazul izotopilor radioactivi ai rubidiului şi potasiului), acesta se acumulează mereu, pe măsură ce trece timpul, şi parametrul caracteristic pentru lungimea intervalului de timp este de astădată raportul dintre cantitatea de element-părinte şi cantitatea de element-descendent. Acest raport se micşorează mereu, fiind într-o legătură cantitativă bine cunoscută cu timpul scurs, legătură comandată de constanta de dezintegrare (viața medie, timpul de înjumătățire); timpul scurs este reprezentat, evident, de intervalul dintre momentul inițial şi momentul final al procesului considerat, dificultatea mare fiind legată de precizarea a ceea ce este momentul inițial, la o determinare de vîrstă. În măsura în care acest interval poate fi identificat cu vîrsta a cărei determinare se urmăreşte şi în funcție de măsurarea foarte precisă a raportului părinte/descendent, ca şi de cunoaşterea nu mai puțin precisă a parametrului de caracterizare a vitezei de desfăşurare a procesului de dezintegrare, este posibilă datarea absolută radioactivă.

O deosebire fundamentală față de cele două principii menționate o prezintă descifrările de mesaj pe care le constituie determinările de vîrste absolute prin metoda carbonului radioactiv. În acest caz nu mai este vorba nici de proporția dintre izotopii din produsul final al unui proces de dezintegrare nici de raportul dintre cantitatea de element radioactiv şi cea de produs de dezintegrare stabil. Pur şi simplu se face comparația între cantitatea de element radioactiv care a mai rămas ca atare într-o combinație şi cantitatea în care este prezent un element „martor", reprezentat de izotopul stabil al lui, care nu are nimic de a face cu procesul de dezintegrare dar care participă la formarea combinației respective în paralel cu izotopul radioactiv, cu acelaşi rol chimic. Pentru precizare, să indicăm că elementul radioactiv este izotopul de masă atomică 14 al carbonului, care se formează continuu din azotul atmosferic sub influența razelor cosmice. El se găseşte în atmosferă într-un raport bine determinat față de carbonul obişnuit, izotopul neradioactiv de masă atomică 12, şi intră în acelaşi raport în compoziția bioxidului de carbon şi, prin intermediul acestuia, în substanțele organice care participă la alcătuirea plantelor şi animalelor. O dată cu încetarea vieții — momentul inițial pentru determinările de vîrstă pe această cale —, izotopul radioactiv al carbonului se împuținează prin dezintegrare pe cînd cel stabil rămîne ca atare. Timpul scurs din momentul încetării vieții organismului respectiv pînă în momentul determinării raportului dintre carbonul 14 şi carbonul 12 se calculează dintr-o relație simplă, în care mai intră, pe lîngă acest raport, şi parametrul de caracterizare cantitativă a desfăşurării procesului de dezintegrare, de exemplu timpul de înjumătățire.

Extrem de numeroase, descifrările de mesaje radioactive pe care le prezintă aceste determinări geocronologice au condus la rezultate de semnificație deosebită pentru ştiințele Pămîntului. Problema vîrstei Pămîntului fusese abordată pe diverse căi, care conduseseră la rezultate diferite, greu de pus în acord în privința ordinului de mărime. Geologii secolului trecut ar putea fi grupați, din punctul de vedere al opiniilor cu privire la vîrsta Pămîntului, în trei clase: „uniformitariştii”, conduşi de Lyell, admiteau pentru planeta noastră o vîrstă infinită, „moderații”, influențați în special de Darwin, considerau că această vîrstă este de cîteva sute de milioane de ani iar „revoluționarii”, acceptînd argumentele de ordin cantitativ aduse de Lord Kelvin printr-o demonstrație intrinsec corectă dar fundamentată greşit pe date geotermice — cum vom vedea în capitolul următor —, adoptaseră o cifră care întinerea Pămîntul: 24 de milioane de ani.

În această atmosferă de complet dezacord asupra unei probleme fundamentale, cu numeroase implicații în diverse direcții, au venit rezultatele descifrărilor de mesaje radioactive. Diferind ca cifre, ele au indicat, totuşi, corect, de la început, ordinul de mărime pentru vîrsta Pămîntului: miliarde de ani. Cifrele pentru precizarea vîrstei au crescut treptat, pe măsura îmbunătățirii preciziei determinărilor şi a eliminării intervenției unor agenți perturbanți, conducînd la valoarea care este acceptată azi: 5 miliarde de ani.

Ordinul de mărime al vîrstei Pămîntului s-a impus în geoştiințe şi prin autenticitatea modului de obținere şi prin acordul lui cu diverse date ale acestor ştiințe, în particular cu duratele necesare, principial, pentru desfăşurarea anumitor procese ca realizarea salinității apelor marine, procesele orogenetice, depunerea formațiunilor sedimentare, evoluția speciilor animale şi vegetale etc.

Impresionantă prin ingeniozitatea descifrării de mesaj care a condus la obținerea ei precum şi prin ordinul ei de mărime, vîrsta Pămîntului este menționată adeseori şi în afara cadrului strict ştiințific, fie în termeni poetici adecvați pentru a o sugera, ca în versurile lui Tudor Arghezi:

„Şi-a mai trecut o vreme, şi zeci de vremi şi sute
Şi mii de vremi, pe număr, în şir nemaiştiute”,

fie chiar cu ordinul de mărime corect — lucru care nu tulbură atmosfera poetică —, cum o face George Călinescu:

„Naintea vieții tale
Cu miliarde de-ani
S-au închegat metale
Şi-au bubuit vulcani”.

În privința determinărilor de vîrste pentru anumite roci, este bine să menționăm

— fără a merge pînă la detalii — contribuția importantă a descifrării mesajelor respective care constă în atribuirea de vîrste absolute diviziunilor de timp stabilite în mod relativ, pe cale stratigrafică şi paleontologică. Aceasta înseamnă indicarea duratelor în ani pentru erele şi perioadele geologice de la Cambrian încoace, adică pentru circa 600 de milioane de ani, cît reprezintă întregul interval de timp datat relativ de geologi. O contribuție poate şi mai importantă este constituită de evaluarea extinderii în timp a Precambrianului şi — ceea ce este şi mai mult — de subdivizarea lui, imposibilă în absența metodelor radioactive, fără urme care să marcheze trecerea timpului, cum sînt fosilele prezente în formațiunile postcambriene. Față de cele şase sute de milioane de ani ale intervalului de timp corespunzător depunerii acestor formațiuni, Precambrianul are o durată foarte lungă: după ce, pînă nu demult, se acceptase ca vîrstă a celor mai vechi roci datate vîrsta de trei miliarde şi patru sute de milioane de ani, recent Precambrianul a mai fost prelungit în trecut cu încă patru sute de milioane de ani.

Trebuie recunoscut că cele mai multe determinări de vîrste geologice absolute au fost făcute în laboratoare de către fizicieni şi chimişti, cel mai adesea fără colaborarea geologilor şi petrografilor. Aceasta s-a resimțit dezavantajos, în faptul că determinările, putînd fi foarte precise pentru proba de rocă studiată, nu au fost, totuşi, totdeauna corect încadrate din punctul de vedere al istoriei trecute a rocii din care fusese extrasă proba şi din acela al caracterelor ei petrografice, pentru care competența se găsea de partea celor absenți: geologii. Să mai amintim că o bună parte din dificultățile care împiedică acordul perfect al cantitativului datărilor absolute cu calitativul celor relative provin din faptul că primele rezultă preponderent din studiul rocilor eruptive, pe cînd limitele de timp stratigrafice şi paleontologice au fost fixate de cercetări efectuate asupra formațiunilor sedimentare.

Progresele care sînt de aşteptat în domeniul descifrării acestor categorii de mesaje terestre privesc în special două direcții: pe de o parte, mărirea preciziei datelor finale (valoarea vîrstelor) prin îmbunătățirea cunoaşterii constantelor fizice care intră în calcule şi prin tot mai bune determinări ale mărimilor supuse observației şi, pe de alta, mai buna armonizare a competenței în domeniul fizicii şi chimiei cu cea din domeniul geoştiințelor. Se pare că acest ultim deziderat nu se poate realiza nici sub eticheta de fizică nucleră aplicată, pe care o reclamă pentru acest domeniu izolaționiştii fizicieni şi chimişti şi nici sub aceea de geologie nucleară, pe care caută s-o impună unii geologi exclusivişti. Dat fiind că studiul fenomenelor nucleare în cadru geologic constituie un domeniu tipic de frontieră şi că el promite să se dezvolte tot mai mult pe baze inter- şi pluri-disciplinare, cercetările în echipe complexe de specialişti vor fi, fără îndoială, o necesitate. Cum se pune şi problema coordonării acestor cercetări, aceasta ar reveni, în principiu, geofizicienilor, competenți atît pentru aspectele fizico-matematice ale metodelor de descifrare cît şi pentru încadrarea geologică a problemelor geocronologice.

•

O altă categorie de mesaje terestre care, fără să fie autentic radioactive, sînt supuse descifrării în cadrul conceptual al georadioactivității este reprezentată de compozițiile izotopice ale anumitor elemente care intră în alcătuirea materialelor din crusta terestră (minerale, roci, resturi organice vechi). Elemente cu rol important în această privință sînt, în particular, oxigenul, sulful şi carbonul.

Constatări mai vechi — în terminologia adoptată de noi: descifrări de mesaje — au arătat că, pentru asemenea elemente, compoziția izotopică este diferită după natura şi originea mineralelor la a căror alcătuire participă ele, adică raporturile dintre cantitățile de izotopi ai aceluiaşi element variază atît cu mineralul din care este extras cît şi, pentru un acelaşi mineral, cu zăcămîntul sau formațiunea din care acesta provine. Față de o compoziție izotopică inițială — s-a adoptat drept termen de referință compoziția izotopică a elementelor din meteoriți —, s-au pus astfel în evidență variații care au sugerat existența unor procese de deplasare a echilibrului izotopilor într-un sens sau altul, în funcție de anumite condiții legate de fenomene fizico-chimice sau chiar biologice. Sugestia a devenit, treptat, convingere şi astăzi se admit ca fapte bine stabilite numeroase constatări de acest fel. În linii cu totul generale se acceptă în prezent ca sens general al schimbării raportului dintre izotopii aceluiaşi element cel reprezentat de îmbogățirea în izotopi grei în fenomenele desfăşurate în cadru exclusiv anorganic şi, invers, de creşterea proporției de izotopi uşori în procesele afectate şi de participarea unor factori de ordin biologic.

Desigur, interesante sînt descifrările de mesaje particulare din această categorie. Vom aminti aici, pentru exemplificare, pe cel reprezentat de compoziția izotopică a oxigenului care intră în alcătuirea silicaților din atîtea minerale şi în a carbonaților, în particular a carbonatului de calciu, prezent în cochiliile atîtor viețăți de altădată. Cei doi izotopi ai oxigenului, cel obişnuit (de masă atomică 16) şi cel mai greu (de masă atomică 18) se găsesc într-un raport care depinde, în mod esențial, de temperatura la care s-au format combinațiile chimice respective. Variația lui, nu atît de mare dar suficientă pentru a fi accesibilă determinării cantitative şi ridicată la un grad mai mare de semnificație pe cale statistică, a putut fi folosită pentru a se pune în evidență variații de temperatură medie a apelor marine din care s-au depus anumite formațiuni geologice sau în care au trăit anumite viețăți, studiate astăzi ca fosile. S-a putut stabili, astfel, pe baza variațiilor acestui raport pentru oxigenul din cochiliile a diverşi belemniți din Cretacicul Europei de vest, mersul temperaturii medii în decursul unui interval de timp destul de lung — între Albian şi Danian —, luîndu-se numeroşi indivizi din diverse etaje geologice. Mai mult decît atît: studiindu-se acelaşi raport pentru mici porțiuni din cochilia aceluiaşi individ, dinspre exterior spre interior, s-a putut determina durata vieții lui prin alternanța de temperatură pusă în evidență, corespunzătoare trecerii de la vară la iarnă.

Sînt evidente implicațiile de ordin paleoclimatic ale unor asemenea descifrări de mesaje, cu prelungiri adeseori foarte îndepărtate. Să menționăm numai, în acest context, că astfel de determinări au fost utilizate, pe baza variațiilor de temperatură dintre zi şi noapte, pentru a se pune în evidență lungimea zilei în trecutul geologic şi a se deduce, din comparația între durata zilei în prezent şi durata zilelor din diverse epoci ale trecutului geologic — valorile fiind stabilite pe largi baze statistice —, încetinirea rotației terestre. În felul acesta, duratelor geologice, rezultate din datările făcute cu „ceasurile radioactive” li s-a îmbogățit conținutul cu detalii furnizate de „ceasurile fosile” de tipul celui menționat mai sus.

•

Ultima categorie de mesaje radioactive ale Pămîntului pe care le mai examinăm este reprezentată de manifestări ale înseşi radiațiilor emise în procesele de dezintegrare. Asemenea mesaje pleacă, evident, numai din porțiunile Pămîntului în care există substanțe radioactive şi pot fi detectate numai în limitele distanțelor pînă la care radiațiile se pot propaga fără a fi prea puternic absorbite. Din acest punct de vedere este de menționat că absorbția este mai intensă pentru radiațiile corpusculare — mai mult pentru particulele „alfa” şi mai puțin pentru particulele „beta” — şi mai redusă pentru cele electromagnetice, motiv pentru care radiațiile „gama” s-au şi numit „radiații penetrante”, în prospecțiunile radiometrice.

Dubla restricție menționată mai sus, legată de existența surselor radioactive şi a unui plafon al absorbției pentru radiațiile emise de ele, limitează considerabil, ca extindere spațială, conținutul informațional al mesajelor autentic radioactive constituite de particulele „alfa” şi „beta” şi de razele „gama” care rezultă din dezintegrări. Caracterul complementar, față de alte date geofizice, al informațiilor pe care le furnizează descifrarea lor le ridică, totuşi, valoarea la un nivel de semnificație deosebită pe plan pur ştiințific şi le asigură prelungiri importante pe plan practic.

De altfel, adeseori unele informații din cele două categorii amintite se suprapun. Acesta este, de exemplu, cazul punerii în evidență a unor importante accidente tectonice sau a altor particularități în distribuția spațială a rocilor care alcătuiesc crusta terestră: falii, ondulații ale fundamentului cristalin sub o cuvertură sedimentară nu prea groasă, variații în structura acestui fundament reprezentate de intruziuni cu proprietăți radioactive diferite etc. În particular s-au dovedit utile, în legătură cu detectarea şi localizarea faliilor, tehnicile de înregistrare şi descifrare a mesajelor radioactive standardizate ca prospecțiuni radiometrice.

Discontinuitățile crustei terestre reprezentate de falii sînt deosebit de importante şi pentru descifrarea particularităților structurale ale porțiunilor de suprafață ale Pămîntului şi pentru localizarea unor zone de interes economic. Frecvența lor este destul de mare, şi o ştiu nu numai geologii. Într-un aforism intitulat „Pavăză indestructibilă”, Lucian Blaga spune: „Scoarța Pămîntului e compusă în întregime

numai din cicatrici” şi nu e departe de realitate, nici în privința faptului pe care îl afirmă, nici în privința semnificației pe care i-o atribuie prin titlu.

Cicatrizate sau nu, aceste răni ale Pămîntului au reprezentat şi reprezintă căi de acces mai uşor spre suprafață pentru substanțele radioactive, fie în stare gazoasă — emanațiile radioactive, propriu-zis numai cea din familia uraniului, adică radonul —, fie dizolvate şi transportate, deci, de soluții. Substanțele radioactive şi descendenții lor activi — cei stabili neinteresînd în această împrejurare — se pot şi depune pe parcursul urmat între blocurile faliilor. Are, astfel, loc o îmbogățire a emisiunii de radiații, a cărei punere în evidență înseamnă, ipso facto, detectarea şi localizarea acestui accident tectonic.

În privința posibilităților de localizare a surselor, se poate sublinia o calitate a acestor mesaje terestre, rezultată — în mod în aparență paradoxal — dintr-un defect al lor, acela că intensitatea radiațiilor scade foarte repede cu distanța, mai repede decît intensitatea cîmpurilor gravific şi geomagnetic. Într-adevăr, pe lîngă descreşterea cu pătratul distanței datorită distribuției radiațiilor în jurul sursei pe suprafețe sferice care descresc cu pătratul razei, are loc şi o descreştere exponențială cu distanța de la sursă, provocată de absorbția radiațiilor pe parcursul străbătut. În felul acesta, dacă sensibilitatea aparatului folosit este destul de mare pentru ca pragul de detecție să asigure nu numai prinderea maximului semnalului ci şi descreşterea acestuia, localizarea sursei radiațiilor se va face cu o precizie remarcabil mai mare decît cea pe baza mesajelor corespunzătoare gravimetrice sau magnetice.

Am mai putea aminti, în legătură cu aplicațiile de ordin practic ale descifrărilor de mesaje radioactive terestre, două potențialități ale lor, frecvent transformate în realități: descoperirea şi conturarea zăcămintelor de minereuri radioactive şi cooperarea la aceleaşi operații pentru zăcămintele de hidrocarburi. Privitor la ultimul punct, este bine să subliniem că posibilitatea corespunzătoare este legată de afinitatea pentru emanațiile radioactive pe care o au în general substanțele organice şi în particular hidrocarburile, ceea ce duce la o accentuare a proprietăților lor radioactive. Pentru petrol lucrul a fost pus în evidență, încă din primul deceniu al secolului nostru, deci chiar de la începuturile radioactivității, de un pionier român în acest domeniu, Dragomir Hurmuzescu.

●

Considerate din punctul de vedere general al contribuției lor la cunoaşterea şi înțelegerea vieții Pămîntului, mesajele radioactive terestre se pot caracteriza prin bogatul lor conținut informațional cu privire la trecutul îndepărtat al Pămîntului dar şi printr-o foarte restrînsă extindere spațială a domeniului de investigație. Deşi o autentică comparație nu se poate face între entități atît de diferite ca timpul şi spațiul, oricine se gîndeşte mai profund la semnificația aportului gnoseologic al georadioactivității nu se poate împiedica de a constata disproporția flagrantă dintre

lungimea intervalelor de timp asupra cărora se extinde puterea de investigație a metodelor ei şi scurtimea distanțelor spațiale accesibile cercetărilor de această natură.

Venind din adîncul trecutului geologic, mesajele radioactive terestre furnizează, ca rezultat al descifrării lor, vîrsta absolută a Pămîntului şi vîrstele absolute ale diverselor formațiuni geologice, date cantitative din care se deduc şi duratele diverselor ere şi perioade geologice. Informații cu caracter mai de detaliu se obțin din descifrarea mesajelor reprezentate de compozițiile izotopice ale unor elemente din minerale şi roci şi — într-un cadru conceptual puțin diferit — din resturile unor viețuitoare din trecutul îndepărtat, cu privire la condițiile din epoca formării, respectiv din timpul vieții lor.

Emise, în prezent, din anumite porțiuni ale Pămîntului, ca cele unde se găsesc zăcăminte de minereuri de uraniu sau ca locurile de îmbogățire în surse radioactive, cum sînt faliile şi zăcămintele de petrol, radiațiile rezultate din dezintegrări constituie şi ele mesaje elocvente. Fără a putea ajunge prea departe de sursele lor — datorită absorbției în mediul de propagare — ele nu sînt de neglijat în rolul lor de purtătoare ale unor informații valorificabile şi pe plan ştiințfic si în direcții practice-economice. În felul acesta, mesajele radioactive ale Pămîntului se înscriu printre mesajele geofizice de semnificație deosebită. Ceea ce scoate şi mai mult în relief valoarea informativă a rezultatelor la care conduce descifrarea lor este caracterul complementar al datelor radioactive față de alte indicații geofizice, fără a mai vorbi de posibilitățile largi de a se obține informații cantitative cu privire la trecutul planetei noastre.

5. CĂLDURA PĂMÎNTULUI

„Istoria Pămîntului este o istorie a căldurii. De-a lungul întregii istorii terestre, mari cantități de energie au fost încontinuu cheltuite în formarea munților, în vulcanism şi în alte activități care au generat continentele, oceanele şi atmosfera. Exceptînd acțiunile agenților de la suprafață, alimentate de căldura Soarelui, energia vine din interiorul Pămîntului şi trebuie să fi fost cîndva sub forma de căldură."

PATRICK M. HURLEY

„Globul pămîntesc văzut din interior îți dă un alt fior decît văzut din exterior... Sub pămînt e altfel Pămîntul. E mai îndesat, mai adevărat. Parcă cel de afară e numai fumul şi putregaiul, aici e focul şi jeregaiul."

MARIN SORESCU

Identificabile direct numai sub formele lor mai particulare şi mai intense, care sînt sporadice ca distribuție geografică şi intermitente ca evoluție în timp, manifestările căldurii Pămîntului sînt, totuşi, omniprezente şi continue. Fenomene geotermice spectaculoase, cum sînt erupțiile vulcanice sau geyserii, ori chiar mai puțin impresionante, ca, de exemplu, izvoarele termale sau fumarolele, apar în relativ puține locuri şi chiar acolo ele prezintă discontinuități în desfăşurarea lor. La o cercetare mai de aproape şi cu mijloace adecvate se poate face, însă, imediat, constatarea că manifestări calorice terestre au loc peste tot şi fără întrerupere.

Ubicitatea şi perenitatea fenomenelor geotermice sînt puse în evidență, în modul cel mai clar, de creşterea cu adîncimea a temperaturii în interiorul Pămîntului, sub porțiunea superficială, de grosime redusă, afectată de variațiile sezonale ale climei şi de circulația apelor subterane. Prezent oriunde, în orice regiune a Globului, fenomenul implică o continuă scurgere de căldură, în sens invers, spre suprafața planetei noastre, de unde căldura este radiată în exterior, în spațiul cosmic. Acest „flux geotermic" constituie principalul mesaj caloric al Pămîntului, a cărui detectare, cu reliefarea caracteristicilor planetare ca şi a particularităților mai mult sau mai puțin regionale, este în curs de efectuare dar a cărui descifrare este abia la început.

Problemele legate de fenomenele geotermice sînt numeroase şi variate. Într-o primă categorie se înscriu cele care privesc bilanțul termic al Pămîntului, procesele de activ şi de pasiv în evoluția energiei care intervine sub formă de căldură în viața planetei noastre. O a doua categorie de probleme este reprezentată de cele ce se pun în legătură cu însuşi fluxul geotermic, deja menționat ca important mesaj fizic terestru. Subordonate acestor două categorii de probleme geotermice majore sînt o serie de probleme nu mai puțin importante dar a căror pondere se împarte între geotermia propriu-zisă şi alte domenii ştiințifice, unele chiar în afara geoştiințelor, sau care au

luat formele predominant tehnice ale aplicațiilor.

Am putea aminti ca astfel de probleme pe aceea a mecanismului de propagare a energiei termice în interiorul Globului — cu importante prelungiri în fizică —, pe aceea a transformărilor ei în energia mecanică responsabilă de activitatea tectonică, pe aceea a manifestărilor locale de eliberare a ei şi, încheind lista, fără a o epuiza, pe aceea a teledetecției în infraroşu. Aceste două probleme de pe urmă excelează sub aspectul lor de aplicații practice.

Se înțelege că, fiindu-i imposibil să le abordeze, necum să le trateze, pe toate, expunerea din acest mic capitol se va limita la a le prezenta — şi numai în linii generale — pe cele două mai importante: bilanțul geotermic şi, în particular, fluxul geotermic. Accentul va cădea pe acesta de pe urmă, în acord cu ponderea mai mare care-i revine în preocupările noastre, prin caracterul său de mesaj al Pămîntului. Cîteva referiri fugare vor fi făcute, totuşi, şi la alte probleme conexe, chiar şi la unele care, minore la scară planetară, sînt de o importanță practică deosebită şi nu sînt nici lipsite, în ansamblu, de potențialități de mesaje terestre.

●

Pe lîngă baza cantitativă construită şi consolidată tot mai mult cu ajutorul datelor rezultate din măsurători, problema bilanțului geotermic prezintă astăzi două importante elemente noi față de ceea ce era ea pentru ştiința secolului trecut. Pe planul faptelor este vorba de luarea în considerare a importantei surse de căldură reprezentată de dezintegrările radioactive iar în domeniul cadrului conceptual, încă preponderent speculativ, de înlocuirea ipotezei cosmogonice a stării inițiale incandescente a Pămîntului prin aceea a formării lui ca aglomerare de pulberi şi protocorpuri cosmice reci. Aceste două elemente nu sînt fără legătură între ele.

În acord cu vechea concepție cosmogonică a desprinderii Pămîntului din Soare, în stare incandescentă, se considera, în secolul trecut, că fluxul continuu de căldură care asigură iradierea permanentă de energie termică în spațiul interplanetar este rezultatul exclusiv al răcirii treptate a corpului fierbinte pe care-l reprezenta Pămîntul în starea lui inițială. Pe această bază a efectuat Lordul Kelvin calculele menționate în capitolul precedent, după ale căror rezultate Pămîntul ar fi trebuit să aibă doar o vîrstă de ordinul de mărime al zecilor de milioane de ani.

După descoperirea radioactivității şi, în particular, după punerea în evidență a degajării de căldură care însoțeşte toate dezintegrările radioactive, s-a recunoscut posibilitatea de a identifica în aceste procese sursa de căldură internă în stare să explice fluxul geotermic, fără a mai fi nevoie să se apeleze la ipoteza stării inițiale incandescente a Pămîntului. În felul acesta, s-a pregătit calea pentru apariția concepțiilor cosmogonice moderne, după care, în esență, planeta noastră s-a format ca un corp la început rece. Acceptatrea unei asemenea vederi implică, evident,

necesitatea de a se explica şi mecanismul fizic care a dus la temperaturile ridicate existente astăzi în interiorul Globului, pe lîngă modalitatea de menținere a fluxului geotermic actual.

Din calculele care se pot face în cadrul unor ipoteze simplificatoare dar folosind relații compatibile cu realitatea şi date numerice furnizate de observații, rezultă că pentru ridicarea temperaturii în interiorul Pămîntului este nevoie de o cantitate de căldură sensibil mai mare decît cea corespunzătoare fluxului geotermic curent.

Formulată în termeni expliciți, problema bilanțului termic al Pămîntului constă, astfel, în stabilirea surselor de energie capabile să asigure în prezent înlocuirea continuă a căldurii pierdute în spațiul cosmic şi furnizarea aceleia utilizate pentru realizarea în trecut a temperaturilor ridicate din interiorul lui. De asemenea, în cadrul problemei bilanțului geotermic nu pot fi neglijate nici alte procese care consumă energie, cum sînt cele care se manifestă, direct sau indirect, în activitatea tectonică.

Vom trece, acum, în revistă sursele de căldură care pot figura în mod semnificativ în bugetul termic al Pămîntului, menționînd şi pe acelea care au fost active, probabil, în trecut, în perioada formării planetei noastre, cu rolul important de a-i ridica temperatura internă. Accentul expunerii, care nu va putea merge pînă la detalii, va cădea, totuşi, pe discutarea proceselor actuale, cărora le revine rolul important al menținerii fluxului geotermic. De altfel, tocmai pentru a servi drept cadru pentru conturarea acestei noțiuni examinăm şi problema bilanțului termic al Pămîntului, căci, din punctul de vedere pe care-l urmărim noi, fluxul geotermic este, la ora actuală, autenticul mesaj caloric al planetei noastre şi de la fidela detectare şi corecta descifrare a lui se aşteaptă lămurirea multor probleme geodinamice.

Este în afară de orice îndoială că principala sursă de căldură, permanent activă, a Pămîntului este constituită de ansamblul proceselor de dezintegrare radioactivă. Elementele radioactive care au avut o contribuție însemnată la producerea căldurii terestre de-a lungul întregii vieți a Pămîntului şi o au şi în prezent sînt relativ puține: doi izotopi ai uraniului (capul familiei uraniului şi capul familiei actiniului), apoi toriul şi izotopul radioactiv al potasiului.

Toate aceste patru elemente sînt larg răspîndite în roci şi au vieți medii de ordinul de mărime al vîrstei Pămîntului aşa încît, active în tot trecutul acestuia, ele se mai găsesc în cantități suficient de mari pentru a constitui şi la ora actuală surse importante de căldură. Calculele făcute, admițîndu-se în întreaga masă a Pămîntului o abundență a lor comparabilă cu aceea din meteoriți, arată că, prin contribuția căldurii degajate de aceste elemente radioactive naturale, s-ar putea echilibra perfect bilanțul geotermic actual. Întrucît, însă, obiecții serioase de ordin geofizic şi geochimic se ridică împotriva unui asemenea „model meteoritic” rudimentar al Pămîntului, rezultatele acestea trebuie acceptate numai ca o indicație de ordin de mărime a plauzibilității concepției după care partea principală a fluxului geotermic din trecut şi de azi poate fi

atribuită dezintegrării izotopilor radioactivi cu viață lungă.

În ceea ce priveşte izotopii radioactivi cu viață scurtă — în vedere ar putea veni cei ai fierului, clorului şi aluminiului —, ei au putut avea un rol important în perioada formării Pămîntului (căci în prezent ei s-au stins), anume în intervalul de timp de circa 5 pînă la 10 milioane de ani care a urmat sintezei nucleelor atomice ale elementelor din sistemul solar primitiv. În particular aluminiul radioactiv a putut contribui în mod esențial la ridicarea temperaturii interne a Globului, cu condiția ca formarea acestuia să nu fi durat mai mult de 20 de milioane de ani.

În perioada de formare a Pămîntului au mai putut avea contribuții la ridicarea temperaturii lui interne şi alte fenomene, de exemplu căderea de corpuri protoplanetare pe Pămîntul primitiv, în curs de creştere, urmată de transformarea energiei lor cinetice în căldură, sau degajarea de căldură datorită continuei comprimări adiabatice. De asemenea a fost desigur activă şi conversiunea în căldură a energiei gravitaționale eliberate prin diferențierea materialului mai mult sau mai puțin omogen care constituia Pămîntul primitiv. Această diferențiere a dus la formarea nucleului terestru de mare densitate şi cu temperaturi ridicate pe care George Călinescu l-a numit

„... sîmburele de nestemate
Şi flăcări îmbălsămate
Cu care metalele ard
De ani un miliard”.

Desigur, o cantitate mai mică de căldură, totuşi semnificativă, a trebuit să apară şi în urma separării crustei terestre de manta.

Un alt fenomen în stare să genereze căldură în interiorul Pămîntului este încetinirea rotației lui, în urma interacțiunii cu Luna şi, într-o măsură mai redusă, cu Soarele, cu manifestări în fenomenul mareelor terestre şi oceanice. Încercările de evaluare cantitativă a căldurii produse pe această cale se lovesc de o mare dificultate în legătură cu distribuția acțiunii de frînare a rotației terestre între mareele hidrosferei şi acelea ale Pămîntului „solid” (contribuția maselor atmosferice este neglijabilă în această privință). Primele ar putea contribui doar la o încălzire superficială, numai mareele „terestre” — afectînd nu numai crusta ci şi mantaua — ar putea avea efecte adînci. Oricum, în prezent fenomenul poate contribui, în ansamblu, cu o mică fracțiune din căldura necesară menținerii fluxului geotermic dar în trecut el a putut juca un rol cu mult mai important la generarea căldurii terestre.

Lista surselor de căldură care iau parte la determinarea bilanțului geotermic merită să fie completată cu cîteva surse care, minore prin contribuția lor relativă, prezintă interes prin adăugarea unor fațete deosebite pentru aspectul complex al ansamblului. Ca asemenea surse geotermice secundare pot fi menționate unele

tranziţii de fază din interiorul Globului, în particular în zonele de discontinuităţi, sau cristalizările şi reacţiunile chimice exoterme.

O contribuţie majoră la activul bilanţului geotermic are, evident, radiaţia solară, care afectează, însă, numai părţile superficiale ale Pămîntului. Importanţa căldurii furnizate de Soare este, totuşi, mare, atît prin valoarea ei absolută cît şi prin participarea ei la fenomenele cele mai variate de la suprafaţa planetei noastre.

Trebuie accentuat, la încheierea acestei enumerări, că, prezentînd încă destule faţete puţin clare, legate mai ales de anumite elemente ipotetice privind formarea Pămîntului, problema bilanţului geotermic a primit, totuşi, în ultimul deceniu, o formă consistentă şi o fundamentare cantitativă, în continuă ameliorare, care îi asigură tot mai mult perspectivele unei rezolvări satisfăcătoare. Dacă am forţa puţin lucrurile şi am considera cu orice preţ şi bilanţul termic al Pămîntului ca un mesaj fizic al lui, am putea spune că detectarea acestui mesaj prin prinderea cvazicantitativă a elementelor lui se face deja în condiţii acceptabile. Ceea ce lasă încă de dorit este, bineînţeles, descifrarea lui.

●

Studiul cantitativ al fenomenelor geotermice a început cu determinări de temperatură. Faptul cunoscut de multă vreme că, abstracţie făcînd de o mică porţiune din crusta terestră, afectată de condiţiile de suprafaţă, temperatura creşte cu adîncimea, şi observaţia ulterioară că rapiditatea acestei creşteri diferă de la o regiune la alta au condus la definirea noţiunii de treaptă geotermică, respectiv a inversului ei, gradientul geotermic. Această mărime de pe urmă, definită ca variaţia de temperatură cu adîncimea, raportată la distanţa dintre punctele între care este constatată ea, evaluată, practic, în grade pe kilometru, s-a dovedit utilă pentru cercetările geotermice efectuate la scări regionale (după cum determinările de temperatură au dat şi dau satisfacţie în cadrul unor investigaţii locale).

Pentru cercetările geotermice la scară planetară s-a impus, însă, o noţiune ceva mai complexă şi cu un conţinut fizic mai bogat, aceea de flux geotermic. Termenul, pe care l-am folosit deja, sugerează el însuşi sensul fizic pe care-l are. Cantitativ, fluxul geotermic este definit ca fiind cantitatea de căldură care străbate în unitatea de timp unitatea de suprafaţă normală pe direcţia de gradient maxim; ca atare el este măsurat în calorii pe secundă şi pe centimetru patrat. O demonstraţie simplă arată că această mărime este reprezentată, în mod echivalent, de produsul dintre gradientul geotermic şi conductibilitatea termică, ceea ce indică şi calea determinării ei: se măsoară „in situ" gradientul geotermic şi în laborator conductibilitatea termică a rocii care constituie formaţiunea geologică din zona determinării.

Atît măsurătorile de teren ale gradientului geotermic, cît şi cele de laborator ale conductibilităţii termice trebuie efectuate cu o foarte mare precizie, şi cu o grijă

deosebită pentru înlăturarea intervenției tuturor agenților perturbanți. Numai aşa precizia finală cu care se va cunoaşte fluxul geotermic, cantitate relativ mică în valoare absolută, va putea asigura detectarea unor eventuale variații cărora să li se atribuie pertinent o semnificație geofizică.

Nu putem intra aici în detalii privind determinările dar, pentru a ilustra cît de departe trebuie împinsă preocuparea de a evita influențe parazite, menționăm numai că, în regiunile în care au existat glaciațiuni în Pleistocen, măsurătorile de gradient geotermic trebuie făcute la adîncimi de circa 200 de metri, unde nu mai sînt de temut efectele reziduale ale acelor glaciațiuni, de mult trecute, care se pot face simțite în porțiunile crustei terestre situate mai aproape de suprafață. Pe de altă parte, extragerea probei de rocă, pentru care urmează să se facă determinarea de conductibilitate termică, implică măsuri speciale de precauție.

Operația este comparativ mai simplă în cazul măsurătorilor în zone oceanice, unde o tijă de pînă la 2 metri este scufundată vertical în sedimentele relativ mai de pe fund şi gradientul este măsurat între doi sau mai mulți termistori fixați pe tijă iar proba destinată determinărilor de conductibiliitate este extrasă de însăşi tija aceasta, prevăzută cu un recipient special pentru colectarea sedimentelor din chiar locul măsurătorii de gradient geotermic.

Fără a fi complet mulțumitor, ansamblul determinărilor existente de flux geotermic se prezintă relativ bine. O lucrare de sinteză din anul 1965 a omologat ca sigure 1150 de determinări de flux geotermic pentru întregul Glob terestru, dintre care, însă, numai 11% erau efectuate pentru zone continentale (şi acestea nu prea bine distribuite). În anul 1970, numărul determinărilor de flux geotermic cu pretenții de semnificație la scară planetară se ridicase la aproximativ 3000.

Din determinările făcute pînă acum se desprind două rezultate însemnate, cu privire la acest mesaj fizic al Pămîntului. Primul este constituit de faptul că, independent de valoarea temperaturilor măsurate şi chiar de valoarea gradienților — primele cu pronunțat caracter informativ local, cei de pe urmă semnificativi la scară regională —, fluxul geotermic este practic aproape acelaşi în orice punct de pe Glob. Remarcabil este, în particular, faptul că nu s-a pus în evidență, contrar tuturor aşteptărilor, nici o deosebire sistematică între valorile fluxului geotermic pentru regiunile continentale şi pentru cele oceanice. Al doilea rezultat important este valoarea numerică a fluxului geotermic.

Media determinărilor, reprezentativă la scară planetară, are o valoare numerică pe care o indicăm aici, dată fiind importanța deosebită a acestei mărimi: 1,5 microcalorii pe secundă şi pe centimetru pătrat. Față de această valoare medie planetară, constituind chiar ea cel mai important mesaj termic al Pămîntului, variațiile regionale pot fi uneori destul de mari şi cu distribuții statistice întrucîtva diferite pentru oceane şi pentru continente, prezentînd pentru fiecare categorie în parte

corelații evidente cu subdiviziunile geologice majore; în particular se manifestă tendința de creştere a fluxului geotermic în zonele orogenice tinere. Media pentru toate determinările „oceanice” rămîne, în continuare, aceeaşi cu media determinărilor „continentale”.

Valoarea medie, indicată mai sus, a fluxului geotermic conduce la o valoare a pierderii totale de căldură a Pămîntului, prin conducție, de circa $2{,}4 \cdot 10^{20}$ calorii pe an. Această cantitate de căldură este de circa patru sute de ori mai mare decît cea pierdută prin activitatea vulcanică de pe întregul Glob. Iată, deci, pe baza acestor două rezultate, sintetizate în valoarea numerică unică, o primă descifrare a principalului mesaj termic al Pămîntului: cea mai mare parte din căldura pe care planeta noastră o pierde prin iradierea în spațiul cosmic vine din adîncimi, căci este aceeaşi pentru orice punct de pe Pămînt, şi ajunge la suprafața terestră prin mecanismul conducției termice, comandat de gradientul geotermic, pe cînd transportul vulcanic de căldură are o contribuție cu totul minoră.

Conținutul informațional al mesajului fizic terestru reprezentat de fluxul geotermic este chiar mai bogat. Cvasiegalitatea valorilor lui medii, luate separat pentru zonele continentale şi pentru cele oceanice, a produs schimbări fundamentale în ideile privitoare la distribuția spațială a surselor căldurii interne a Pămîntului. Rocile care alcătuiesc crusta continentală cuprind în special granite şi granodiorite, cu un conținut de substanțe radioactive dintre cele mai ridicate printre rocile comune. Pe de altă parte, grosimea crustei continentale este mare față de a celei oceanice (circa 35 de kilometri, față de aproximativ 5 pînă la 6 kilometri). A fost, astfel, într-adevăr o surpriză să se găsească pentru fluxul geotermic o valoare medie „oceanică” practic egală cu cea „continentală”, cînd se aştepta o valoare de circa patru-cinci ori mai mare pentru aceasta de pe urmă.

Interpretarea acestui fapt — un mesaj special, conținut în acela general al fluxului geotermic — nu este încă complet elaborată dar vechile vederi trebuie, evident, schimbate fundamental. Cadrul în care urmează să se facă revizuirea lor pare a fi determinat, în linii mari, de părerea că, pentru suprafețe de ordinul de mărime al sutelor de kilometri pătrați, cantitatea totală de substanțe radioactive este peste tot aproape aceeaşi, distribuția ei radială fiind, totuşi, diferită sub continente față de cea sub oceane: o concentrare mai mare de substanțe radioactive spre suprafață ar corespunde zonelor continentale, pe cînd în zonele oceanice aceeaşi cantitate totală ar fi distribuită pînă la adîncimi mai mari.

În legătură cu influențele provocate în valorile fluxului geotermic de deplasările de mase fierbinți — magme, ape termale, vapori şi gaze la temperaturi ridicate — se pot semnala tendințe locale evidente, atît în zonele continentale cît şi în cele oceanice. Asemenea efecte se manifestă, în particular, în zona circumpacifică şi în a dorsalelor medio-oceanice. Variația rapidă a acestor efecte cu distanța demonstrează, în mod

convingător, caracterul local şi superficial al surselor lor.

Încercări de corelare a variațiilor regionale ale fluxului geotermic cu alte particularități geofizice ale zonelor în care ele apar s-au făcut dar încă nu au dus la rezultate sigure. În această categorie intră paralelizările valorilor fluxului geotermic cu ondulațiile geoidului, cu seismicitatea şi cu mişcările crustale recente. Există unele indicații că, de exemplu, o coborîre a geoidului ar corespunde unei creşteri regionale a fluxului geotermic dar corelările sînt prea slabe pentru a fi convingătoare. Perspectivele de continuare a descifrării mesajelor geotermice sînt promițătoare şi în această direcție.

●

O problemă interesantă, legată de descifrarea mesajului fizic constituit de fluxul geotermic şi cu implicații nu numai pentru geodinamică ci chiar pentru fizică, este aceea a mecanismului care, independent de natura surselor de căldură, asigură menținerea acestui flux. În cele ce preced, noi am utilizat deja, pentru a desemna acest mecanism, termenul de conducție termică. Noțiunea care-i corespunde în cadrul uriaş al fenomenelor terestre nu este, însă, atît de simplă ca în condițiile controlabile şi simplificate ale laboratorului.

Plecînd de la fapte de observație, vom constata că, dacă luăm valoarea medie de 1,5 microcalorii pe secundă şi pe centimetru pătrat pentru fluxul geotermic şi o valoare medie reprezentativă a conductibilității termice a rocilor de 6 milicalorii pe centimetru, pe secundă şi pe grad, rezultă un gradient geotermic de 25° pe kilometru (adică o valoare a treptei geotermice de 40 metri pentru un grad). Dacă am extrapola valabilitatea acestei valori pînă la o adîncime de numai 100 de kilometri, temperatura ar trebui să fie acolo de 2500°, ceea ce ar implica topirea completă a materialului prezent în zona respectivă. Pe de altă parte, temperatura compatibilă cu existența de magme bazaltice ar trebui să atingă local 1200° la adîncimea de 60 de kilometri. Rezultă de aici că gradientul geotermic trebuie să descrească cu adîncimea cu un factor de aproximativ 10, înainte de a se atinge adîncimea de 100 de kilometri. Aceasta s-ar putea realiza fie printr-o concentrare a surselor de căldură — în speță substanțele radioactive — în apropierea suprafeței Pămîntului, fie printr-un mecanism de propagare a căldurii mai activ decît conducția termică normală (ori printr-o intervenție comună a celor două modalități de realizare a condițiilor la limită impuse de observații).

O examinare mai detaliată a situației, în special sub oceane, arată că cea de-a doua posibilitate principială trebuie să fie în orice caz admisă, cel puțin ca intervenție cu pondere mai mare, chiar dacă nu exclusivă. În mod firesc se pune atunci întrebarea: Care este mecanismul, mai eficace decît simpla conducție, care asigură transferul de căldură din interiorul Pămîntului spre suprafață? Curenții de convecție, care principial ar putea veni în vedere, nu satisfac condiția de ordin de mărime, la vitezele pe care le-

ar putea avea în interiorul mantalei terestre, aşa că soluția s-a căutat în imaginarea unor procese asigurînd un mecanism de propagare a căldurii echivalent, formal, cu o creştere a conductibilității termice. În felul acesta s-a ajuns la ideea unei conductibilități „radiative” sau „fotonice” şi a unei conductibilități „excitonice”, care s-ar adăuga în adîncime conductibilității „fononice”, obişnuită în roci în condițiile din apropierea suprafeței terestre.

Într-adevăr, în apropierea suprafeței Pămîntului, căldura este transmisă în roci prin vibrații — de aici termenul de „fonon” — ale rețelelor cristaline, adică prin interacțiuni ale atomilor vecini, aranjați în cristalele mineralelor componente. Această componentă fononică a conductibilității, singură prezentă în condițiile de suprafață, este influențată de variațiile de temperatură şi de presiune care intervin în adîncime, pentru ca la temperaturi de ordinul a 200°-300° să i se adauge, în special pentru diverşi silicați, un mecanism suplimentar: transferul de căldură prin radiație de la un atom la altul, componenta radiativă a conducției. La temperaturi şi mai ridicate devine important un mecanism de transfer de energie cu totul diferit, care a fost desemnat prin termenul de conducție prin excitoni, întrucît implică propagarea stărilor excitate ale atomilor.

Se ajunge, aşadar, la imaginea complexă a unei conductibilități termice cu trei componente care ar interveni în proporții variabile cu temperatura: mai întîi componenta fononică, existentă la toate temperaturile (forma clasică a conducției), apoi componenta fotonică şi cea excitonică, ambele importante la temperaturi mai ridicate din mantaua terestră, pînă la adîncimi de circa 1500 de kilometri; dincolo de aceste adîncimi componenta radiativă ar începe să scadă, pe cînd celelalte continuă, amîndouă, să crească.

Fără îndoială că distribuția elementelor radioactive cu adîncimea trebuie luată şi ea în considerare în încercările de descifrare de mesaje legate de fluxul geotermic şi implicațiile lui. Generarea de căldură prin dezintegrări radioactive este atît de intensă, pentru concentrațiile de substanțe radioactive constatate efectiv în roci, că duce la cantități de căldură suficiente pentru a explica în întregime fluxul geotermic chiar dacă degajarea ar avea loc numai în porțiunile foarte superficiale ale Pămîntului.

Se pune şi în această privință, deci, problema variației cu adîncimea a concentrației de elemente radioactive. Din păcate, nu vom putea intra nici aici în amănunte dar vom discuta, totuşi, pe scurt, un aspect al problemei bilanțului geotermic care apare în legătură cu această implicație a descifrării mesajului Pămîntului reprezentat de fluxul geotermic. Este vorba de caracterul deficitar sau excedentar al acestui bilanț — dacă se consideră că despre un echilibru perfect este greu să se vorbească —, lucru pe care nu l-am discutat în contextul strict al bilanțului termic al Pămîntului, căci are prelungiri importante peste limitele acestei probleme.

În principiu sînt date ambele posibilități şi ele au şi fost discutate, nu numai în

termeni restrîns ştiinţifici dar chiar sub aspecte larg filozofice. După o predominare a concepţiei unei continue răciri a Pămîntului, care s-ar fi găsit la început în stare incandescentă, concepţie care oferea vieţii de pe el perspectiva unei morţi prin frig, s-a trecut de cealaltă parte. În urma descoperirii continuei generări de căldură prin dezintegrările radioactive, s-a admis concepţia unei lente încălziri, cu promisiunea unei morţi prin căldură. Trebuie subliniat că, în ambele cazuri, evoluţia este extrem de lentă aşa că pînă la dispariţia vieţii de pe Pămînt — prin frig sau căldură, excluzînd intervenţia unei cauze antropogene — ar fi, în orice caz, încă foarte mult timp.

Este interesant de examinat şi o concepţie intermediară care, admiţînd o alternanţă ciclică a celor două evoluţii, la foarte lungi intervale de timp, imaginează următorul mecanism: Dacă la un moment dat bilanţul geotermic ar fi excedentar, adică dacă Pămîntul s-ar găsi într-o perioadă de încălzire — cum se consideră că ar fi în prezent —, o parte importantă a interiorului lui fiind în stare solidă, degajarea continuă de căldură ar putea duce la o fluidizare treptată a acestei părţi (căci conducţia n-ar fi în stare, chiar cu adăugarea componentelor suplimentare care au fost menţionate mai sus, să asigure transferul spre exterior al întregii cantităţi de căldură degajate). Această fluidizare ar favoriza apariţia curenţilor de convecţie din ce în ce mai activi. Transferul masiv de căldură spre exterior, asigurat de conducţia mărită prin ridicarea temperaturii şi de convecţia adăugată în urma fluidizării, ar face ca Pămîntul să treacă într-o perioadă de răcire, căldura transportată la suprafaţă şi iradiată în spaţiu fiind mai mare decît cea generată, adică bilanţul geotermic devenind deficitar. Răcirea ar implica, însă, mărirea vîscozităţii interiorului fluid şi, deci, încetinirea treptată a convecţiei, pînă la suprimarea ei prin solidificarea mediului în care se desfăşura. Ciclul ar fi, astfel, închis şi ar putea reîncepe.

Lucrurile ar putea fi mult mai complicate decît arată această schemă suprasimplificată. Printre altele ar interveni în bilanţul geotermic, alternativ excedentar şi deficitar, şi cantităţile de căldură asociate proceselor de fluidizare şi solidificare imaginate pentru asigurarea mecanismului alternării. Această concepţie, sugerată de problemele interdependente ale bilanţului şi fluxului geotermic şi oferind interesante perspective de explicare a multor fenomene din complexul geodinamic, nu prezintă, însă, deocamdată, consistenţa intrinsecă a unui sistem perfect coerent şi nici încadrarea faptică pe deplin satisfăcătoare care să-i asigure acceptarea unanimă. Acest lucru este cu atît mai semnificativ cu cît ea nu este de dată recentă, a fost numai reactualizată şi completată cu elemente noi de unele implicaţii în direcţia ei ale vederilor actuale cu privire la dinamica interiorului Globului.

Să mai amintim, pentru a încheia cu această categorie de probleme, că existenţa curenţilor de convecţie din mantaua terestră a fost postulată, din considerente geodinamice, de multă vreme. Chiar dacă acestor curenţi, reprezentînd deplasări lente ale materialului mantalei terestre, nu le revine un rol important în transferul de căldură din interiorul spre exteriorul Pămîntului, datorită vitezei lor foarte reduse, le

rămîne marea responsabilitate de a contribui la asigurarea mecanismului tectonicii globale în imaginea ei actuală de „tectonică a plăcilor”, cum vom vedea în ultimul capitol al acestei scrieri. Compatibilitatea dintre existența lor şi condițiile din interiorul Pămîntului este subliniată, cum am văzut cînd am discutat mesajele gravitaționale terestre, şi de unele considerente legate de turtirea Pămîntului, în stare să furnizeze indicații asupra vîscozității maselor din interiorul Globului. Rezervele formulate mai sus, în legătură cu concepția alternanței perioadelor de excedent şi de deficit al bilanțului geotermic în evoluția planetei noastre, nu vizează direct existența curenților de convecție.

●

Să amintim acum, pe scurt, şi aspectele geotermice ale problemei de mare actualitate a teledetecției, cu foarte importante perspective de dezvoltare şi chiar cu remarcabile performanțe înscrise deja la activul ei. (Nu mai departe decît în februarie 1974, a doua zi după revenirea pe Pămînt a misiunii Skylab 3, se anunța descoperirea sigură, prin tehnicile detecției în infraroşu, a unor zone termale de interes economic în Florida şi probabilitatea existenței unor resurse energetice importante — zăcăminte de petrol — în alte zone.)

Cum se ştie, se desemnează prin termenul de teledetecție un ansamblu de tehnici, aplicate cu ajutorul avioanelor, baloanelor stratosferice, rachetelor şi sateliților, prin care se conturează o porțiune a suprafeței terestre sau un obiect de dimensiuni mai mari de pe ea (sau chiar de sub ea, dar situat nu prea adînc), care prezintă deosebiri, dintr-un anumit punct de vedere, față de mediul înconjurător. Realizată sub forme extrem de variate, teledetecția este, în fond, o fotografie aeriană, de la foarte mari altitudini, în general, folosind radiațiile dintr-un anumit domeniu de lungimi de undă, pentru care atmosfera este transparentă.

Această condiție este satisfăcută nu numai de domeniul vizibil şi de un spectru relativ larg de microunde ci şi de infraroşul situat între ele şi reprezentat de radiațiile calorice. Deşi vaporii de apă şi bioxidul de carbon intervin supărător, prin absorbții puternice ale acestor radiații, într-o anumită bandă de lungimi de undă, rămîn încă largi domenii ale spectrului infraroşu, spre vizibil ca şi spre microunde, disponibile pentru scopurile teledetecției. Aceasta utilizează atît radiațiile infraroşii care vin în mod natural, ca generate de Pămînt sau ca radiații solare reflectate de suprafața terestră (teledetecția „pasivă”) cît şi radiații controlate de observator, emise dintr-un dispozitiv care zboară cu el, şi reflectate de Pămînt (teledetecția „activă”).

Foarte amănunțit elaborată ca tehnică fotografică în infraroşu, asociată cu dispozitive radar cu examinare laterală şi, foarte recent, chiar cu laseri speciali pentru infraroşu, teledetecția este lipsită de avantajul examinării stereoscopice. În schimb ea a fost adaptată şi determinărilor cantitative, prin calibrarea dispozitivului de observație cu un corp negru intern şi prin asocierea cu termometre radiative. Determinările de

temperatură a solului, efectuate astfel din aer, sînt în bun acord cu cele făcute la suprafața Pămîntului, valorile obținute fiind reprezentative, ca valori medii, pentru o suprafață mai mare dar pentru un strat foarte superficial, pe cînd valorile măsurate la sol corespund unei suprafețe mai mici însă şi proprietăților termice ale unei porțiuni de teren de grosime supusă controlului.

Dat fiind că teledetecția în infraroşu este comandată în fond de temperaturile de la suprafața Pămîntului, o problemă de prim ordin a ei este alegerea celui mai potrivit timp pentru efectuarea înregistrărilor. Rezultatele obținute pe baza punerii în evidență a contrastelor de temperatură sînt cu totul remarcabile: cartări geologice, descoperiri şi extinderi de zăcăminte de minereuri, localizări de structuri potențial petrolifere, indicații de ordin structural (falii, cute, anticlinale, domuri), conturări de zone termale, informații asupra compactității solurilor ca şi asupra stabilității terenurilor în pantă. Optimiştii vorbesc chiar de performanțe în supravegherea şi prevederea activității vulcanice ca şi în studiul seismicității şi în prevederea cutremurelor de pămînt.

Constituind — alături de prospecțiunile geotermice — importante prelungiri pe plan aplicativ ale cercetărilor privind fenomenele legate de căldura Pămîntului, tehnicile teledetecției în infraroşu, un domeniu particular dar dintre cele mai dezvoltate ale teledetecției în general, reprezintă simultan o detectare şi o descifrare de mesaj fizic al Pămîntului. Situată deocamdată preponderent în planul calitativului, perspectivele ei de trecere spre cantitativ au fost deja deschise. Asocierea sistemelor pasive şi active, adică a detectării şi descifrării de mesaje termice naturale şi provocate, promite dezvoltări ale teledetecției în infraroşu care, solicitate în primul rînd de necesități economice, ar putea să se prelungească şi în domeniul propriu-zis al cercetărilor geotermice. Nu sînt, astfel, excluse contribuții de valoare cel puțin în extinderea rapidă şi în ameliorarea cunoaşterii distribuției temperaturilor de suprafață şi a dependenței lor de condițiile locale.

●

Din expunerea care precedă, se desprind, fără îndoială, cel puțin două lucruri: interesul domeniului — deşi prezentat doar în linii de schiță — şi caracterul lui de vie efervescență, sub dubla acțiune a acestui interes şi a invitației la speculații, care rezultă din incompleta determinare metrologică şi conceptuală a problemelor lui. Apoi, chiar dacă problemele geotermice se pun azi şi aici, ele îşi au începutul foarte departe în timp ca şi în spațiu, în epoca formării planetei noastre şi în interiorul foarte adînc al ei.

Privind Pămîntul în întregime, fenomenele geotermice au principala sursă în zonele lui inaccesibile iar datele noastre de observație provin din puncte relativ puțin numeroase, distribuite neuniform pe suprafața terestră şi limitate la porțiunile de suprafață ale Globului. Încă din secolul al XVII-lea, Robert Boyle remarca, în legătură cu caracterul „superficial” al informațiilor geotermice: „Şi mult mai puțin avem vreo cunoştință sigură despre temperatura părților mai dinăuntru şi (dacă pot spune aşa)

mai centrale ale Pămîntului, în care sîntem încă ignoranți şi vom continua, mă tem, să fim încă mult timp. Căci trebuie notat că ceea ce a fost discutat pînă acum se referă numai la temperatura acelor părți subterane în care oamenilor le-a fost permis să ajungă prin săpare”.

Deşi în cele trei secole care au trecut de cînd Boyle făcea această observație progresele au fost mari, disproporția dintre ce se ştie şi ce ar trebui ştiut este încă flagrantă în geotermie. Este adevărat că descoperirea radioactivității a permis fixarea cîtorva jaloane sigure, pe lîngă ceea ce au adus observațiile. Ea a deschis, însă, şi calea pentru speculații privind interiorul inaccesibil al Pămîntului iar omul de ştiință nu a urmat sfatul poetului:

„Stai pe planetă de noroi
...
Nu tulbura cu gîndurile tale
Scrumirea flăcării centrale!”
(George Călinescu)

Gîndurile cercetătorilor au mers chiar foarte departe, adeseori mai departe decît limitele pînă la care faptele indicau teren sigur. Dar cînd este vorba de un teren care trebuie cucerit nu se face consolidarea după ocuparea lui?

6. UNDE ELASTICE ÎN PĂMÎNT

„În ultimii cincizeci de ani s-a ajuns treptat la aprecierea că seismologia este fecundă nu numai prin aplicarea metodelor fizice pentru a arunca lumină asupra naturii şi caracteristicilor cutremurelor de pămînt ci şi prin utilizarea datelor seismice ca sursă de cunoaştere a structurii interne a Pămîntului. Cînd se produce un cutremur, în interiorul Pămîntului se transmit unde, care sînt înregistrate în observatoare pe seismograme; prin descifrarea înregistrărilor, seismologul face radiografia Pămîntului."
K.E. BULLEN

„Ce te scuturi tu, Pămîntule, fără pricină ştiută?"
TUDOR ARGHEZI

Aspectul sub care cutremurele de pămînt s-au impus, mai întîi, atenției omului a fost, desigur, acela de calamitate naturală. Fenomene impresionante prin capacitatea lor de distrugere, adăugată imprevizibilității şi implacabilității lor, cutremurele au devenit, relativ tîrziu, obiect de cercetare ştiințifică. Ele s-au dovedit, totuşi, în scurt timp, a fi foarte importante mesaje fizice ale Pămîntului.

Suportul lor fenomenologic este reprezentat de undele elastice care sînt generate în focarele seismice şi care se propagă, în interiorul Globului, în toate direcțiile, aducînd cu ele informații atît despre fenomenele din focar cît şi despre drumul parcurs de acolo pînă la locul de înregistrare. Din păcate, aceste „semnale utile", complexe prin ele însele, apar pe un fond de „zgomot perturbant", datorit condițiilor locale ale amplasamentului şi particularităților echipamentului stațiunii de înregistrare, ceea ce complică foarte mult detectarea, identificarea şi descifrarea lor.

În acest capitol, de dimensiuni extrem de reduse în raport cu vastitatea, complexitatea şi importanța domeniului seismologiei, expunerea se va limita doar la aspectul de mesaj fizic al undelor elastice provocate de cutremurele de pămînt în interiorul Globului şi la descifrarea lor, în dublul scop al cunoaşterii mecanismului de producere a fenomenelor seismice şi al obținerii unei imagini cît mai fidele a structurii interne a planetei noastre. Nu vor putea fi amintite decît în treacăt — întrucît sînt mai puțin semnificative ca mesaje, în sensul adoptat de noi — importante date seismologice legate de unele probleme de ordin practic, cu prelungiri pe plan economic şi chiar... diplomatic, cum sînt zonările seismice în vederea realizării, cu cheltuieli minime şi cu eficiență maximă, a construcțiilor antiseismice, respectiv discriminarea între undele elastice provocate de cutremurele naturale şi cele generate de exploziile subterane artificiale.

Subliniind, de la început, că descifrarea mesajelor terestre pe care le constituie undele seismice este — ca şi operațiile corespunzătoare celorlalte mesaje fizice ale

Pămîntului — tot o problemă inversă, adică o caracterizare de cauză plecînd de la cunoaşterea efectelor, vom prezenta, mai întîi, cadrul general în care se efectuează această descifrare aşa cum rezultă el, schematic, din termenii problemei directe corespunzătoare: prevederea efectelor plecînd de la fenomenele considerate a fi cauza lor. În acest cadru vom situa, apoi, mesajele seismice ale Pămîntului şi vom trece în revistă descifrările lor actuale cele mai importante.

•

Formulată de Tudor Arghezi în context literar, întrebarea care stă ca al doilea citat în fruntea acestui capitol s-a pus pentru om din cele mai vechi timpuri şi se menține şi azi, doar uşor atenuată, chiar în domeniul cercetărilor ştiințifice. Date fiind proporțiile pe care le pot lua cutremurele de pămînt, caracterul lor de inevitabilitate şi impresia puternică exercitată de manifestările lor asupra omului — aproape cu totul neputincios în a-şi apăra viața şi bunurile de efectele distrugătoare ale unor fenomene încă imprevizibile —, nu este de mirare că această întrebare se pune mereu, cu insistență. Mai mult, ținînd seama de complexitatea fenomenelor seismice, de multitudinea şi varietatea factorilor ce intervin în înlănțuirea lor, de vastitatea cadrului în care ele se desfăşoară ca şi de relativa modicitate a mijloacelor de investigație, apare justificată, pînă la un punct, şi pe plan ştiințific, sugestia privitoare la ignorarea cauzei cutremurelor, cu care se termină întrebarea poetului.

Justificarea este numai parțială, în prezent, căci o parte din înlănțuirea de fenomene care constituie mecanismul de producere a cutremurelor de pămînt se cunoaşte relativ bine. Tocmai de această parte cunoscută ne vom servi pentru a schița, în termeni calitativi de problemă directă, cadrul de interpretare a datelor de observație ale seismologiei, în vederea abordării descifrării de mesaje care ne interesează.

Complexul fenomenelor seismice poate fi reprezentat, la nivelul cunoştințelor actuale, de următoarea imagine schematică, chiar suprasimplificată. Sub influența tensiunilor care se nasc în interiorul lui, Pămîntul este supus unor continue deformări. Dintre modificările de formă care au loc: deformări elastice, deformări plastice şi fracturi, primele două nu provoacă schimbări cu caracter brusc, pe cînd cele din ultima categorie implică o variație bruscă de tensiune în locul unde se produce fractura, adică în porțiunea din interiorul Pămîntului, situată mai mult sau mai puțin adînc (dar nu mai adînc de 720 de kilometri), numită focar; de dimensiuni relativ reduse, focarul este asimilat, de regulă, cu un punct iar proiecția lui pe suprafața Pămîntului reprezintă ceea ce se desemnează obişnuit ca epicentrul cutremurului.

O asemenea variație bruscă a stării de tensiune din interiorul maselor terestre generează unde elastice ce se propagă în mediul complex care constituie interiorul planetei noastre. Mişcarea care rezultă poate avea manifestări distrugătoare la distanțe nu prea mari de sursa ei şi, deşi puternic atenuată, mai poate avea intensități care să permită înregistrarea ei — ca deplasare, viteză sau accelerație a solului — chiar la

distanțe foarte mari de epicentru, dacă se dispune de instrumente adecvate şi suficient de sensibile, amplasate în condiții corespunzătoare. Ansamblul acestor fenomene, constituind o perturbație elastică complexă, reprezintă un cutremur de pămînt.

Nu este greu să se remarce care sînt părțile mai puțin clare ale acestei imagini schematice. Ele corespund mai mult mecanismului de generare a tensiunilor cărora li se atribuie deformările decît eliberării acestor tensiuni în cadrul procesului de „faliere”, care conduce la apariția fracturilor. Situația se prezintă sensibil mai bine în privința producerii undelor seismice, a propagării şi atenuării lor.

Lăsînd la o parte procesele încă insuficient cunoscute ale apariției şi acumulării tensiunilor în porțiunea din interiorul Globului care, prin eliberarea bruscă a lor, devine focarul (sau hipocentrul) unui cutremur de pămînt, vom examina acum — pe scurt dar nu fără o încercare de încadrare istorico-literară — caracterul ondulatoriu al substratului mecanic al fenomenelor seismice, tipurile de unde produse, propagarea lor în interiorul Pămîntului şi forma sub care ele apar înregistrate. Rostul acestei examinări este acela de a se fixa cîteva repere, destinate a servi ca elemente aperceptive pentru discutarea procesului de descifrare a mesajelor seismice ale Pămîntului, reprezentate de diverse manifestări ale cutremurelor.

Caracterul de unde al perturbațiilor seismice a fost recunoscut de multă vreme. Se pare că ideea unui substrat ondulatoriu al cutremurelor de pămînt ar fi apărut în urma observațiilor făcute cu ocazia cutremurului care a distrus Lisabona în 1755. (Este vorba de cutremurul menționat de Voltaire în „Candide”, cutremur căruia doctorul Pangloss îi atribuie o origine fantezistă: „Acest cutremur nu este ceva nou; oraşul Lima a suferit scuturături asemănătoare anul trecut; aceleaşi cauze — aceleaşi efecte: există desigur o dîră de pucioasă pe sub pămînt de la Lima la Lisabona.”) Cum acest cutremur s-a produs în timpul serviciilor religioase de „ziua tuturor sfinților”, foarte numeroase persoane din diverse regiuni ale Europei au văzut candelabrele oscilînd. Nu este, astfel, surprinzătoare emiterea, în 1760, a ipotezei undelor elastice din interiorul Pămîntului ca echivalent fenomenologic al cutremurelor.

Este interesant să semnalăm că, vorbind în „Frații Jderi” despre „cutremurul cel mare” din 1471, Mihail Sadoveanu scoate şi el în relief caracterul ondulatoriu al fenomenului: „... cutremurul se desluşi deplin ca o unduire de val...”. Şi mai interesant este faptul că, în concordanță deplină cu observațiile ştiințifice, se menționează o a doua etapă în desfăşurarea fenomenului: „Al doilea val al cutremurului scutură pămîntul cu mai multă putere şi mai îndelung decît întîia oară, cu aceleaşi detunete subpămîntene”. Într-adevăr, deşi apar simultan în focar, diversele tipuri de unde elastice produse de cutremure se propagă în interiorul Pămîntului cu viteze diferite şi ajung, deci, succesiv într-un loc situat la oarecare depărtare, în ordinea vitezelor lor descrescătoare.

O primă categorie de unde seismice este formată de undele longitudinale, unde

de comprimare şi dilatare, care provoacă în mediul de propagare o deplasare a particulelor acestuia după însăşi direcția lor de înaintare. Dintre toate undele seismice, ele au cea mai mare viteză de propagare, ceea ce face ca ele să sosească mai întîi în locul în care se observă manifestarea efectelor cutremurului. Înscriindu-se ca prime impulsuri pe seismogramă, undele longitudinale au şi fost numite în latineşte „primae" şi sînt desemnate, de regulă, prin litera P, inițiala acestui cuvînt.

Cu o viteză mai mică se propagă undele elastice transversale, pentru care deplasarea particulelor mediului se face după direcția perpendiculară pe aceea de propagare, ele avînd, astfel, caracterul de „unde de forfecare". Aceste unde ajung în rîndul al doilea la locul de înregistrare, cu o întîrziere cu atît mai mare, față de momentul sosirii undelor P, cu cît înregistrarea se face la o distanță epicentrală mai mare. Numite unde „secundae", undele transversale sînt indicate, în mod obişnuit, prin litera S, cu care începe acest cuvînt.

Din focar, undele P şi S se propagă prin „volumul" Pămîntului în toate direcțiile, în particular şi spre locul de observație. (De fapt, propagarea nu se face în linie dreaptă. Cum vitezele cresc, în general, cu adîncimea, atît pentru undele P cît şi pentru undele S, traiectoriile urmate de ele sînt, în conformitate cu legile refracției, curbe cu concavitatea spre suprafața terestră.) Ambele categorii de unde de volum au caracterul de unde precursoare ale cutremurului propriu-zis distructiv, ele avînd efecte relativ reduse în această privință. Prima „unduire de val" pe care o reprezintă ele constituie, însă, un important mesaj al Pămîntului. Cu un secol şi jumătate înainte ca Bullen să fi subliniat, prin cuvintele citate în fruntea acestui capitol, conținutul informațional — cu privire la interiorul Pămîntului — al undelor seismice, Shelley a arătat, în „Prometeu eliberat", în termeni aproape ştiințifici, că ele

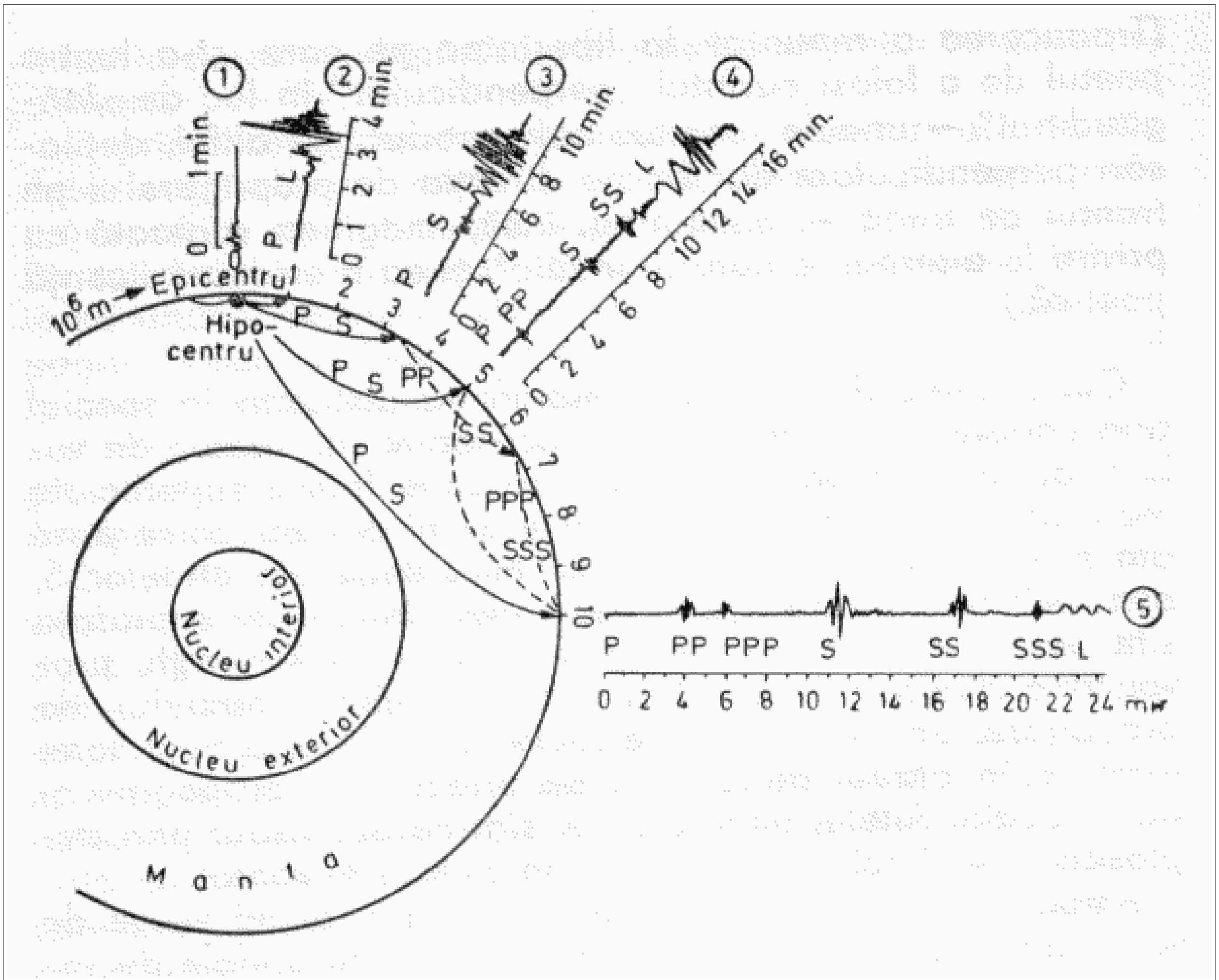
„Cînd longitudinale şi cînd transversale
Străbat întunecata crustă terestră şi, sosind la suprafață,
Dezvăluie secretele din adîncul inimii Pămîntului".

(Traducerea a renunțat la libertatea pe care şi-a luat-o poetul de a folosi cuvîntul „perpendicular" în loc de „longitudinal" — undele longitudinale produc, de altfel, deplasări perpendiculare dar nu pe direcția de propagare ci pe frontul de undă —, menținînd, însă, imaginea sugerată cu privire la alternanța naturii undelor, şi ea o evidentă licență poetică.)

Cutremurele de pămînt se manifestă distructiv în special prin undele de suprafață. Spre deosebire de undele de volum, acestea se propagă prin porțiunile foarte superficiale ale crustei terestre, ca şi cînd ar proveni din epicentru şi nu din hipocentru, cu viteze şi mai mici decît ale undelor S, aşa încît la distanță ajung după ele. Undele de suprafață sînt de două categorii. Unele, numite unde Rayleigh, provoacă o deplasare complicată a particulelor mediului de propagare, anume o

mişcare retrogradă după o traiectorie eliptică, în planul determinat de direcția de propagare şi de verticală. Altele, undele Love, sînt caracterizate prin deplasări mai simple, transversale în planul orizontal.

Ambele categorii de unde de suprafață, avînd viteze de valori apropiate, au perioade mai lungi decît undele de volum, ceea ce a făcut să fie numite unde „longae”, de unde şi desemnarea lor prin litera L. Producînd deplasări de amplitudini mari şi durînd un interval de timp mai lung, ele constituie, macroscopic, faza a doua — cea distructivă — a cutremurului, atît de bine descrisă de Sadoveanu.



5. Mesaje seismice naturale şi descifrarea lor.

Cîteva imagini, cu caracter de sinteză a trecerii în revistă care precedă, sînt prezentate în figura 5, destinată să încheie această discuție în termeni de problemă directă. Punînd în evidență formele sub care se prezintă principalele mesaje seismice ale Pămîntului, ca înregistrări de unde produse de cutremure, această figură indică şi traiectoriile după care se pot propaga undele de volum P şi S de la hipocentrul cutremurului (practic coincident cu epicentrul) pînă la locul de înregistrare, considerat la cinci distanțe diferite de focar.

Dacă înregistrarea se face într-un loc situat în zona epicentrală, pentru care perturbația seismică reprezintă un „cutremur local”, diversele unde seismice se înregistrează practic suprapuse, la un interval de timp foarte scurt după momentul producerii lor în focar (cazul 1). Pînă la distanța de circa 1000 de kilometri se vorbeşte de un „cutremur foarte apropiat”, pe a cărui seismogramă undele de volum şi de suprafață încep să se separe unele de altele, fiind înregistrate cu decalaje de pînă la 2 minute, fără, însă, ca undele S, care apar în trena undelor P, să poată fi uşor identificate (cazul 2). Se consideră, apoi, că avem de-a face cu un „cutremur apropiat” (evident, la scară planetară) pînă la distanțe epicentrale de ordinul a 3000 de kilometri, înregistrările punînd clar în evidență undele P, S şi L (cazul 3). La distanțe şi mai mari, de circa 5000 de kilometri, perturbația seismică reprezintă ceea ce se poate numi fără ezitare un „cutremur depărtat”, pe a cărui seismogramă apar diverse „faze” ale undelor seismice, de exemplu, pe lîngă cele simple P, S şi L, şi unde longitudinale care s-au reflectat odată pe fața interioară a suprafeței Pămîntului şi ajung să se înregistreze, după undele P, ca unde PP; la fel, există unde SS (cazul 4). Pot apărea şi faze, care nu sînt marcate pe figură, ca PS sau SP, dacă reflexia undelor se face cu schimbarea caracterului lor (longitudinal sau transversal). În fine, la distanțe şi mai mari, de ordinul de mărime al sfertului de meridian şi mai mari, nu mai este o figură de stil să se vorbească despre un „cutremur foarte depărtat” (sau teleseism), pentru care „al doilea val” al cutremurului, reprezentat de undele L, se înregistrează la peste 20 de minute după sosirea undelor P; între aceste extreme, se înregistrează, evident, undele S şi diversele faze PP, PPP, SS, SSS (cazul 5). Se înțelege că pot apărea şi faze complexe de tipul PS, SP, PPS, PSS etc.

Trebuie să adăugăm că schema pe care am prezentat-o este foarte mult simplificată. Fazele undelor seismice înregistrate sînt mult mai numeroase şi mai variate decît ar sugera această schemă, în care s-au luat în considerare numai reflexii ale undelor P şi S pe fața interioară a suprafeței terestre, cu sau fără menținerea caracterului lor. Undele de volum se mai pot reflecta pe suprafața de separație dintre manta şi nucleu sau pot pătrunde în nucleu prin refracție. Reflexia pe suprafața nucleului exterior, indicată prin litera c în simbolul de reperare al fazei respective, poate schimba sau nu natura undei incidente, aşa încît la suprafața Pămîntului se pot înregistra faze ca, de exemplu, PcP, PcS, ScS sau ScP. Refracția urmată de propagarea în nucleul exterior se indică prin litera K şi poate duce, pe înregistrări, la faze PKP, PKS etc; în nucleul exterior undele seismice nu se pot propaga decît ca unde longitudinale, mediul respectiv comportîndu-se ca un fluid, deci simbolul K nu comportă nici o ambiguitate în privința naturii undelor la care se referă.

În schimb, în nucleul interior, cu proprietăți de corp solid, în particular cu rezistență la forfecare, pe lîngă undele longitudinale care pătrund din nucleul exterior, refractîndu-se şi păstrîndu-şi natura (fenomenul este indicat în simbolul fazei respective prin I), pot apărea şi unde transversale, rezultate din refracția undelor longitudinale din nucleul exterior, însoțită de schimbarea caracterului lor (fenomenul

este desemnat prin litera J). În consecință, pot exista, de exemplu, faze ca PKIKS, SKJKP, PKJKS etc.

Să mai amintim că, în cazul undelor generate de cutremure cu focar adînc, poate avea loc o primă reflexie pe fața interioară a suprafeței Pămîntului, într-un punct relativ apropiat de epicentru, unda care se propagă între focar şi acest punct fiind desemnată prin litera minusculă corespunzătoare naturii ei: p (longitudinală) sau s (transversală). Se înțelege uşor ce reprezintă, atunci, de exemplu, simbolurile pScP sau sSKJKS. În primul caz este vorba de o undă care pleacă dintr-un focar adînc spre suprafața Pămîntului ca undă longitudinală, se reflectă pe suprafața terestră ca undă transversală, se propagă ca atare în manta, pînă la suprafața nucleului, unde se reflectă schimbîndu-se în undă longitudinală, cum va ajunge la locul de înregistrare. Faza indicată de al doilea simbol corespunde următoarelor evenimente: plecarea, de la focar adînc, a unei unde transversale, reflectarea ei pe fața interioară a suprafeței terestre, fără schimbarea naturii, refracția ei la suprafața nucleului exterior şi pătrunderea în el, obligatoriu ca undă longitudinală, pătrunderea în nucleul interior, prin refracție cu schimbarea în undă transversală, ieşirea în nucleul exterior (evident, ca undă longitudinală) şi, apoi, pătrunderea prin refracție în manta, cu schimbarea naturii, deci sosirea la locul de înregistrare ca undă transversală.

Se conturează acum aspectele mai importante ale descifrării mesajelor seismice ale planetei noastre, reprezentate chiar de undele produse de cutremure, detectate şi identificate, prin intermediul înregistrării pe seismograme, după propagarea lor, pe diverse trasee prin interiorul Globului, cu schimbări de direcție şi, eventual, de natură, în urma reflexiilor şi refracțiilor suferite la suprafețele de discontinuitate care separă diferitele diviziuni ale interiorului Pămîntului. Deşi se prezintă sub aspecte variate, problemele ridicate de descifrarea acestor mesaje se reduc, în esență, la una singură: problema inversă a seismologiei, care constă în caracterizarea sursei, pe de o parte, şi a parcursului undelor înregistrate, pe de alta, prin reconstituirea fenomenelor care au avut loc în focar şi a celor de pe traseul complicat urmat de ele.

Se înțelege că rezolvarea unei asemenea probleme se face cu mari dificultăți, legate atît de ambiguitatea intrinsecă a caracterului ei invers cît şi de ignorarea unor parametri importanți, în particular a parametrilor elastici, respectiv a vitezelor de propagare a undelor de volum în diversele zone din interiorul Globului. În măsura în care aceste dificultăți pot fi învinse sau cel puțin ocolite, este posibil să se obțină informații asupra naturii proceselor din focarele cutremurelor, respectiv asupra structurii interne a Pămîntului. Sînt cele două categorii de descifrări de mesaje seismice terestre pe care urmează să le trecem în revistă.

•

În dezacord flagrant cu titlul adoptat pentru scrierea de față, care subliniază caracterul actual al descifrărilor de mesaje terestre luate în considerare, vom părăsi

pentru moment actualitatea, pentru a trece sumar în revistă cîteva aspecte din trecutul informațiilor privitoare la cutremurele de pămînt, atît ca simple menționări cît şi ca încercări de descifrare a acestor mesaje ale Pămîntului. Operația prezintă interes prin ocazia pe care o oferă de a se semnala justețea unor observații făcute direct, fără ajutor instrumental, şi de a se constata evoluția de la „explicații" cu totul naive şi fanteziste spre interpretări mai realiste, prin invocarea unor fenomene naturale în tentativele de descifrare, chiar dacă nu este vorba de procese care intervin efectiv în cazul cutremurelor.

Din foarte numeroasele imagini conținute în ceea ce constituie o adevărată mitologie a seismologiei, vom evoca — pentru meritul ei de a ține seama de cele două „valuri" din manifestările macroseismice — numai pe aceea a peştelui uriaş care ar susține Pămîntul şi ale cărui mişcări bruşte ar fi la originea cutremurelor de pămînt. Iat-o în prezentarea lui Sadoveanu: „N-a dat din coadă prea tare peştele cel mare pe care stă aşezat Pămîntul. Precît spun oamenii cei vechi, este apă fără sfîrşit care se chiamă Marea. Şi la fața apei stă peştele cel mare, cu poruncă de la începutul zidirii să ție sub Soare Pămîntul. Din vreme în vreme acel peşte are şi el nevoie de somn, adoarme, îi intră apă în nări şi strănută; ş-atunci se deşteaptă şi bate o dată din coadă; pe urmă bate ş-a doua oară. Aşa s-a cutremurat zidirea lumii de două ori şi azi". Cum am remarcat deja, interesantă este menționarea celor două bătăi din coadă, corespunzînd, evident, efectelor macroscopice ale undelor de volum, precursoare, respectiv ale undelor de suprafață, de paroxism al cutremurului.

Ecouri ale preocupărilor legate de cutremurele de pămînt apar în numeroase şi variate documente ce ne-au parvenit din trecutul îndepărtat al omenirii, precum şi în opere literare şi filozofice din antichitate. Mențiuni despre cutremure se găsesc — uneori cu detalii descriptive semnificative —, de exemplu, în Biblie iar descrieri ale lor au fost date de Homer în „Odiseea", de Virgil în „Eneida" şi în „Georgice", de Eschil în „Prometeu înlănțuit", de Euripide în „Ifigenia în Taurida". Încercări de clasificare şi chiar ipoteze cu pretenții de explicare a producerii cutremurelor, deci adevărate tentative de descifrare a mesajelor seismice — arît de imperfect recepționate, lăsînd la o parte efectele distrugătoare —, au fost făcute de gînditori ca Aristotel, Seneca, Lucrețiu şi Pliniu.

Nu este lipsit de interes să menționăm, în această ordine de idei, că ipoteza lui Aristotel cu privire la mecanismul de producere a cutremurelor de pămînt, anume că ele ar fi provocate de degajarea cu putere a aerului închis în cavități subterane — concepție desigur neconformă cu realitatea dar avînd meritul incontestabil de a face apel la fenomene naturale, într-un domeniu în care, pînă atunci, nu se manifestase decît imaginația necontrolată —, s-a transmis de-a lungul evului mediu pînă în epoca lui Shakespeare, în a cărui piesă „Henric al IV-lea" găsim următoarea prezentare a ei (pe care o redăm în traducerea lui Dan Duțescu):

„... Pămîntul
E canonit c-un soi de junghi în pîntec,
De vîntul pe nedrept întemnițat
În burta lui; cercînd să iasă-afară
El zgîlțîie Pămîntul şi dărîmă
Clopotnițe şi foişoare vechi".

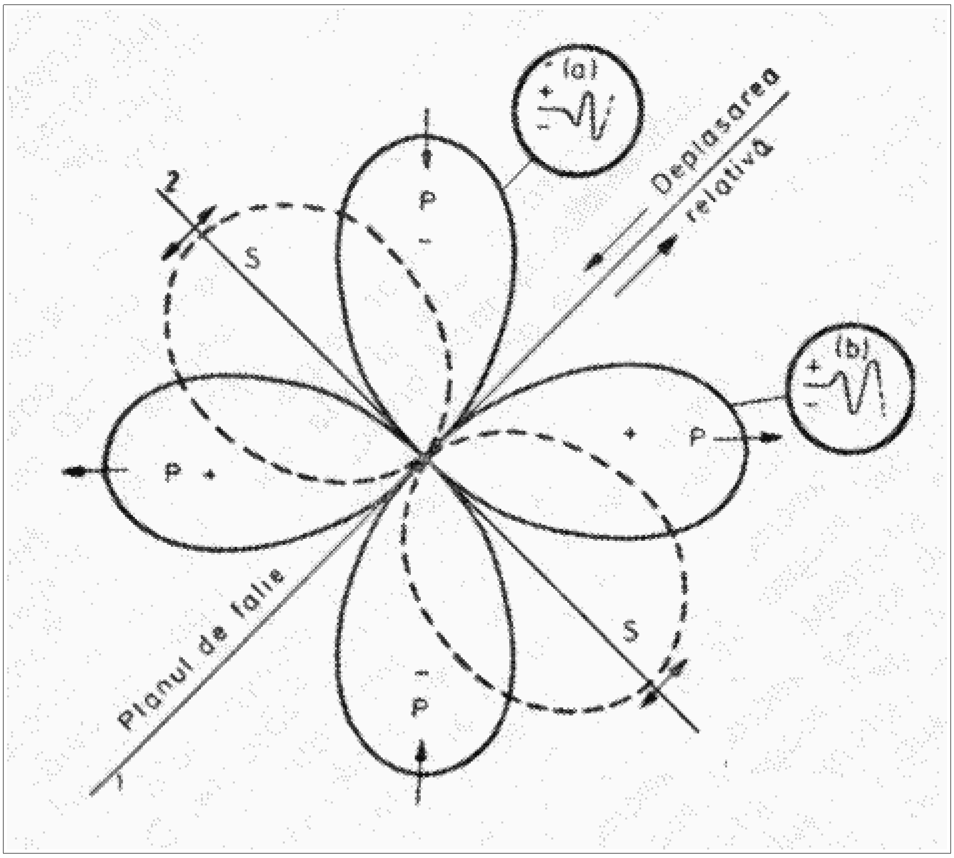
Am anticipat că, la ora actuală, cutremurele sînt considerate ca reprezentînd manifestări, la suprafața Pămîntului, prin intermediul undelor elastice, ale unor modificări cu caracter brusc, ce au loc în sînul maselor terestre. Această concepție, ale cărei principale elemente vor fi prezentate, în linii de schiță, mai jos, a rezultat din descifrarea mesajelor Pămîntului reprezentate de undele seismice.

Forma sub care mesajele seismice sînt utilizate în descifrările avînd ca obiect reconstituirea proceselor din focarele cutremurelor de pămînt este aceea a înregistrărilor obținute în cît mai multe puncte, distribuite cît mai uniform şi pînă la distanțe suficient de mari de la focarul cutremurului considerat. Principalul element pe care trebuie să-l furnizeze seismograma în fiecare din punctele de înregistrare este semnul primei sosiri în undele P, adică precizarea dacă aceste unde sosesc la stațiunea de înregistrare ca unde de dilatare sau ca unde de comprimare; informații suplimentare privind amplitudinea acestor unde, precum şi semnul şi amplitudinea undelor S ca şi date asupra undelor de suprafață sînt bineînțeles binevenite şi pot duce la detalieri interesante ale imaginii proceselor focale.

Pentru înțelegerea modului în care se efectuează operația de descifrare, pe această bază, este bine să precizăm că marea majoritate a cutremurelor de pămînt sînt cutremure tectonice. În asemenea cazuri, energia potențială este înmagazinată progresiv sub formă de tensiuni elastice în rocile care constituie crusta terestă şi chiar în sînul maselor subcrustale, pînă la adîncimi trecînd cu ceva peste o zecime din valoarea razei terestre — nu s-au identificat, însă, focare de cutremure la adîncimi mai mari de 720 de kilometri.

Energia astfel acumulată este eliberată brusc, sub formă de unde seismice, în momentul în care aceste tensiuni depăşesc rezistența materialelor respective. În acest moment se produce o ruptură, o falie, şi cele două blocuri rezultate se deplasează, în acelaşi mod brusc, unul în raport cu celălalt, rezolvînd tensiunile acumulate anterior şi transformînd în energie seismică — energie mecanică transportată de undele seismice — energia potențială corespunzătoare. Deplasarea relativă a celor două blocuri, rezultate în urma apariției fracturii şi participante la dinamica procesului de faliere, provoacă atît unde P, cît şi unde S. În figura 6 este reprezentată schematic distribuția în direcție a amplitudinilor primelor sosiri, în cazul unui cutremur cu un astfel de mecanism focal, pentru ambele categorii de unde. În cerculețe este dată imaginea corespunzătoare a începutului înregistrării pentru undele P, în stațiuni seismologice

situate la oarecare distanță de focarul cutremurului, considerat — pentru motive de simplitate — a fi sediul unui proces de faliere după direcția orizontală (falie transcurentă sau de decroşare), produs chiar la suprafață. În cazul unei stațiuni situate în fața blocului în deplasare, prima sosire în unda P va fi, evident, o comprimare şi se va înregistra pe seismogramă ca o deplasare convențional pozitivă (cerculețul din dreapta figurii), pe cînd într-o stațiune față de care blocul faliei se depărtează prima sosire în unda P va fi o dilatare, înregistrată ca o deplasare negativă (cerculețul de sus).



6. Mecanismul de producere şi înregistrarea undelor seismice provocate de un cutremur de pămînt.

Se înțelege că deplasările corespunzătoare undelor P vor fi nule în planul însuşi al faliei (planul 1), mişcările în sensuri opuse ale celor două blocuri anulîndu-şi reciproc efectul, ca şi în planul normal pe acesta şi trecînd prin focar (planul 2) şi vor atinge valori maxime în planele bisectoare ale diedrelor rectangulare determinate de aceste două plane „nodale”; amplitudinile deplasărilor vor avea valori corespunzătoare mersului curbei pline din figura 6.

Este, de asemenea, evident, dacă se ține seama de natura transversală a undelor S, că amplitudinea acestora va fi nulă în planul de falie (1) şi maximă în celălalt plan nodal (2), cu o distribuție a valorilor de felul celei indicate în figura 6 de curba întreruptă.

Această imagine a distribuţiei semnelor şi valorilor deplasărilor corespunzătoare primelor sosiri în undele P — rămîne să discutăm mai încolo cazul undelor S — este în perfectă concordanță cu observațiile făcute în zonele unde procesul de faliere, reprezentînd cauza unui cutremur, este de tipul modelat de figura 6 şi accesibil observației directe. În asemenea situații simple — cazul a numeroase cutremure generate de celebra falie San Andreas din California sau al unor cutremure prealpine, de exemplu al unui cutremur din 1935 avînd focarul în sud-vestul Germaniei (Suabia superioară), pentru care există date de observație de foarte bună calitate, provenind din stațiuni bine repartizate geografic —, s-a stabilit cu certitudine distribuția semnelor şi amplitudinilor primelor sosiri ca fiind conformă imaginii descrise mai sus, doar cu uşoare modificări în amplitudini, datorite condițiilor locale de propagare şi de înregistrare a undelor.

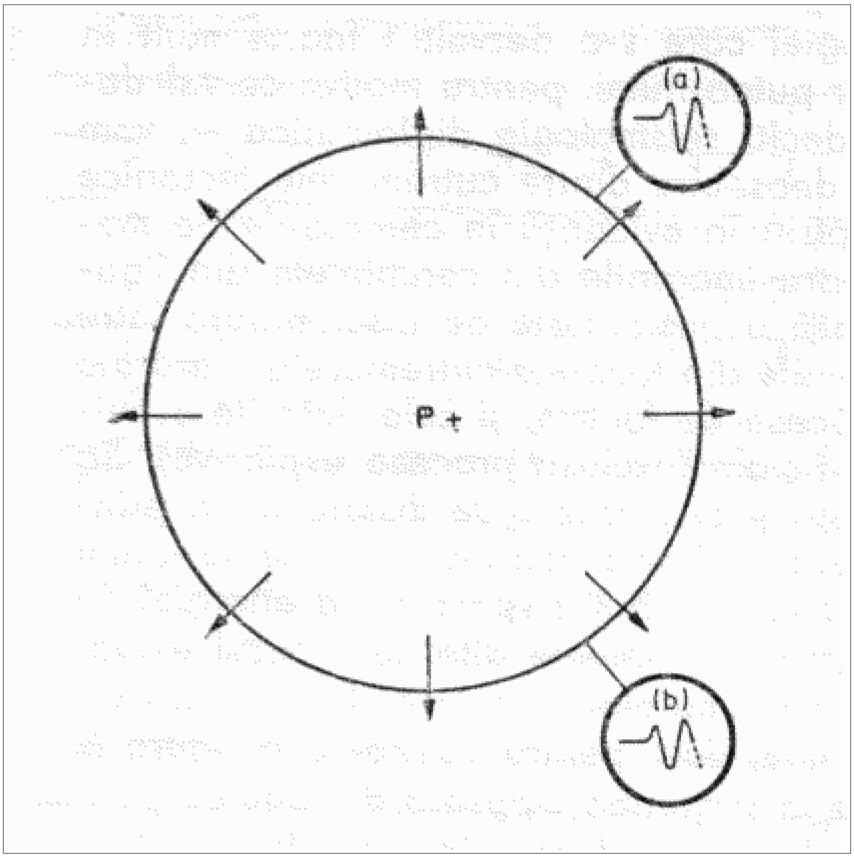
În cazul general, problema descifrării mesajelor seismice ale Pămîntului, în vederea determinării mecanismului de producere a cutremurelor — pusă, evident, ca problemă inversă — este complicată, chiar principial şi cu atît mai mult în condițiile complexe ale realității. În primul rînd, dacă se ține seama numai de semnul primelor sosiri în undele P, problema rămîne nedeterminată, căci ceea ce se poate stabili, pe baza unor foarte bune date de observație, este doar orientarea celor două plane nodale, în care deplasările sînt nule, rămînînd deschisă problema de a se preciza care din acestea este planul de falie. În al doilea rînd, descifrarea este mult îngreuiată de complexitatea imaginii distribuției geografice a semnelor (şi amplitudinilor) primelor sosiri, pentru o orientare oarecare în spațiu a planului de falie. În fine, dificultățile intrinsece ale problemei sînt mult accentuate de eventualele eterogenități şi anizotropii ale mediilor de propagare a undelor, ca şi de deosebiri de ordin instrumental şi de condiții geologice de amplasare între stațiunile care furnizează datele de observație.

Înlăturarea ambiguității legate de identificarea planului de falie dintre cele două plane nodale stabilite cu ajutorul undelor P este posibilă, în principiu, prin luarea în considerare a undelor S — lucrul este clar indicat de imaginea distribuției deplasărilor dată de figura 6. Rezultatele obținute în numeroase cercetări din acest domeniu au arătat, însă, că în unele cazuri utilizarea undelor S a produs mai curînd o agravare a confuziei decît o lămurire a situației. Pe lîngă faptul că identificarea primelor sosiri în undele S este adeseori nesigură — ele apar în timp ce se înregistrează sosiri ulterioare de unde P —, utilizarea convenabilă a undelor transversale în studii de mecanisme este limitată la anumite distanțe epicentrale.

Este, totuşi, posibil să se reducă sensibil şi chiar să se înlăture complet ambiguitatea în obținerea soluțiilor de plan de falie, folosindu-se, de la caz la caz, diverse date suplimentare. S-au dovedit utile, în particular, informații geologice-tectonice pentru cutremurele crustale (superficiale sau normale) şi cele de tectonică globală sau geotectonice pentru cutremurele subcrustale (intermediare şi adînci). Şi într-un caz şi în celălalt, considerații de ordin fizic, privind legătura dintre mecanismul

unui cutremur şi proprietățile mediului din focar şi din jurul lui, pot contribui cu elemente importante la restrîngerea, eventual chiar la eliminarea, ambiguității în determinarea planului de falie. Limitînd această descifrare de mesaj al Pămîntului la cadrul strict seismologic, am putea menționa şi posibilitatea luării în considerare a unor informații conținute în anumite particularități ale undelor de suprafață, înregistrate în diversele stațiuni, în special ale undelor Love, comparabile, în acest rol, prin transversalitatea lor, cu undele S.

Posibilitatea determinării planelor nodale, în cazul unei orientări oarecare a lor, (ele trebuind să rămînă, în orice caz, reciproc ortogonale) este asigurată de reprezentarea într-o proiecție stereografică adecvată a amplasamentelor stațiunilor de la care provin datele de observație. Trasarea, într-o asemenea proiecție, a urmelor planelor care separă zonele cu semne pozitive şi negative, deci comprimări şi dilatări, în undele P, cu respectarea condiției de perpendicularitate mutuală, rezolvă relativ comod această etapă a problemei mecanismului focal.



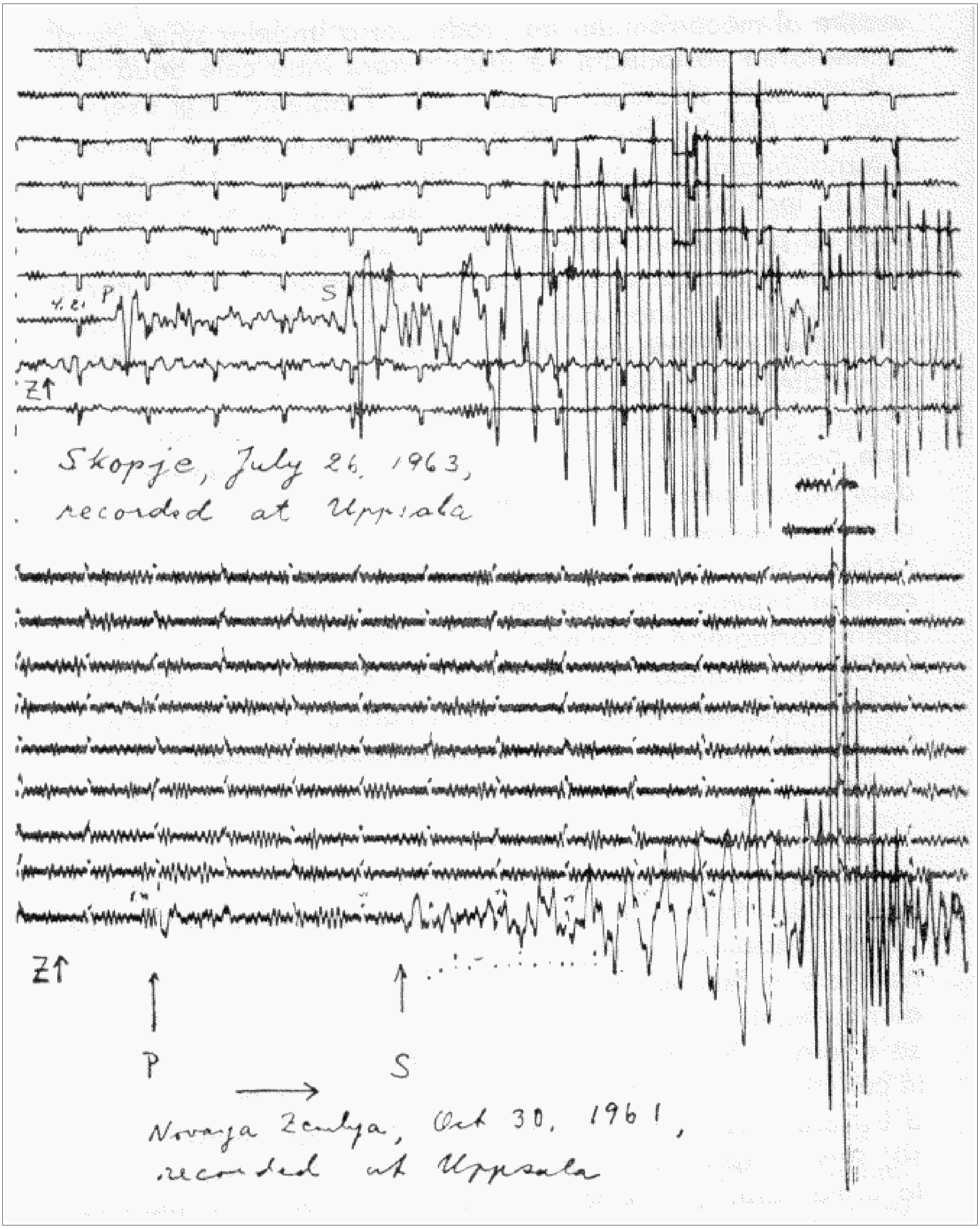
7. Mecanismul de producere şi înregistrarea undelor seismice provocate de o explozie subterană.

Dacă în marea lor majoritate (circa 95%) cutremurele de pămînt sînt cutremure tectonice, pentru care descifrările de mesaj privind procesele din focar se efectuează în cadrul schițat în cele ce preced, rămîne, totuşi, încă o minoritate care nu trebuie ignorată. Deşi cu totul rare, există încă două tipuri de cutremure: cutremure de prăbuşire şi cutrmure de explozie, ambele generînd, în principiu, numai unde

longitudinale. Cutremurele de prăbuşire se produc în regiunile carstice, unde există frecvente goluri subterane iar cele de explozie apar în legătură cu unele manifestări vulcanice.

Raritatea acestor două categorii de cutremure nu le-ar justifica menționarea, în acest context, dacă mecanismul lor de producere n-ar fi interesant pentru analogia pe care o prezintă cu acela al cutremurelor artificiale, provocate prin explozii subterane, analogie mergînd pînă la identitate principială în cazul cutremurelor de tip exploziv, naturale şi artificiale. Pentru acest motiv, se dă, în figura 7, imaginea mecanismului de producere a undelor seismice (principial exclusiv unde P), în cazul unei explozii, precum şi forma pe care o are începutul înregistrării unui asemenea eveniment seismic, independent de caracterul natural sau artificial al lui. Se înțelege că, aşa cum indică forma curbelor din cerculețe, oriunde s-ar face înregistrarea, în orice direcție s-ar găsi locul de înregistrare față de sursa undelor, prima sosire în P este totdeauna pozitivă, adică o comprimare. Evident, situația este inversă pentru un cutremur de prăbuşire, de la care primele sosiri ale undelor P sînt totdeauna dilatări.

Pentru că nu vom putea intra aici în detalii privind un domeniu al seismologiei care s-a dezvoltat foarte mult în ultimul timp — el s-ar putea numi, pentru motive ce vor deveni evidente numaidecît, seismologie diplomatică —, vom semnala că această deosebire dintre cutremurele tectonice şi cele de explozie, pusă în evidență în cercetările de mecanism — a se compara imaginile din cerculețele din figurile 6 şi 7 — sugerează o posibilitate de discriminare între undele seismice provenite din focarele cutremurelor naturale (aproape exclusiv de faliere) şi cele datorite evenimentelor seismice artificiale (exclusiv procese explozive). Să mai adăugăm că există şi alte criterii de discriminare, printre altele distribuția energiei seismice între undele de volum şi cele de suprafață sau distribuția spectrală a energiei, în funcție de frecvența undelor, ambele diferite în cazul exploziilor şi în acela al cutremurelor naturale. Fără a insista asupra acestei probleme, dăm pentru ilustrare, în figura 8, înregistrările obținute la stațiunea Uppsala din Suedia pentru cutremurul natural care a distrus în iulie 1963 oraşul Skopje din Iugoslavia (curba superioară) şi pentru o explozie nucleară, din seria încercărilor din Novaia Zemlia (curba inferioară), evenimente produse la distanțe comparabile de locul de înregistrare, cum arată intervalul de timp dintre sosirea undelor P şi S, aproape acelaşi în cele două cazuri. De remarcat şi deplasările relative diferite ale solului, înregistrate pe seismogramele celor două evenimente, pentru diversele unde, punînd în evidență distribuția diferită a energiei în spectrul de frecvență al acestora.



8. Cazuri reale de înregistrare a unui cutremur de pămînt (sus) şi a unei explozii nucleare (jos).

Desigur, studiul undelor seismice provocate de explozii subterane artificiale — în cazul unor explozii puternice nu este exagerat să se vorbească de adevărate cutremure antropogene — poate duce şi la informații asupra structurii interne a Pămîntului. Adeseori descifrarea unor asemenea „mesaje provocate" ale Pămîntului se

face mai uşor, numărul parametrilor necunoscuți dintre cei care determină evenimentul final fiind mai redus decît în cazul unui seism natural, lucru care se va discuta mai încolo.

Aici s-a urmărit numai o comparație a cutremurelor şi exploziilor subterane (nucleare sau chimice) din punctul de vedere al mecanismului de producere a undelor seismice şi semnalarea posibilității de discriminare între cele două cazuri, pe baza studiului acestor unde. Problema unei asemenea discriminări are importante implicații pentru politica internațională, în legătură cu termenii unui tratat de renunțare la încercările de explozii nucleare subterane, tratat din care nu pot lipsi prevederile referitoare la controlul respectării lui. Şi problema mare, asupra căreia încă nu s-a căzut de acord, este dacă acest control se poate face pe baza unei simple înregistrări de la distanță a undelor seismice provocate — a căror interpretare să nu lase nici un dubiu asupra caracterului sursei de la care provin — sau dacă este necesar un control la fața locului. Este aspectul modern al dificultății de discriminare între semnale suprapuse, care este relatată în termeni diferiți, dar tot în legătură cu războiul şi cutremurele de pămînt, de Tit Liviu în „Ab urbe condita": pentru a sublinia cît de crîncenă a fost lupta dintre cartaginezi şi romani de la Trasimene (încheiată cu victoria lui Hanibal), el spune că zgomotul luptei a făcut să nu se simtă cutremurul de pămînt care a avut loc: „Tantus fuit tumultus proelli ut nemo senserit motum Terrae".

●

În celebrele sale „Lecții de seismometrie", seismologul rus Golițîn foloseşte o comparație deosebit de sugestivă pentru a sublinia rolul mesajelor seismice ca mijloc de cunoaştere a fenomenelor din interiorul Pămîntului. Îi cităm aici cuvintele pentru că, nefăcînd o separație între ceea ce se referă la focar şi ceea ce priveşte propagarea undelor, în consecință şi alcătuirea internă a Globului, ele pregătesc o trecere netedă de la prima descifrare importantă de mesaj seismic (privind mecanismul focal), discutată pînă aici, la următoarea (referitoare la structura interiorului planetei noastre), de care ne vom ocupa de acum înainte. „Fiecare cutremur de pămînt — spune Golițîn — poate fi comparat cu un felinar care se aprinde pentru puțin timp, luminează interiorul Pămîntului şi prin aceasta ne permite să cercetăm ce se petrece acolo. Lumina acestui felinar este deocamdată foarte slabă; nu încape, însă, nici o îndoială că ea va deveni cu timpul mai puternică şi ne va ajuta să obținem idei clare despre aceste fenomene complicate ale naturii".

Aşa cum a prevăzut Golițîn, „lumina" proiectată intermitent de cutremure asupra fenomenelor din interiorul Pămîntului s-a intensificat mereu şi, grație ei, s-a ajuns astăzi la o imagine destul de clară atît a proceselor ce se desfăşoară în focarul unui cutremur de pămînt cît şi, prin intermediul celor din mediul prin care se propagă undele generate acolo, a structurii interne a Pămîntului. Situația era confirmată ca atare, la o jumătate de secol după ce Golițîn a scris cuvintele de mai sus, de către

Bullen, în citatul pus în fruntea acestui capitol. Separînd cele două funcțiuni ale studiului cutremurelor: pe de-o parte, furnizarea de informații asupra fenomenelor seismice înseşi şi, pe de alta, conturarea unei imagini cît mai fidele a interiorului Globului, Bullen subliniază, în particular, pe aceasta de pe urmă.

După ce am examinat modalitatea de a descifra mesajele seismice ale Pămîntului în prima direcție, cu rezultatul punerii în evidență a mecanismului focal, prin determinarea planului de falie, vom aborda acum a doua categorie importantă de descifrări de mesaje ale Pămîntului, purtate de undele elastice generate de cutremure, cele destinate să conducă la lămurirea structurii interiorului Globului. O vom face tot în linii generale, fără a neglija, însă, ceea ce este esențial în asemenea descifrări.

Mesajul seismic propriu-zis, care serveşte în scopul menționat, fiind reprezentat tot de înregistrările stațiunilor seismologice, accentul cade, de astă dată, nu pe primele sosiri şi pe semnul lor ci pe succesiunea în timp a sosirilor diferitelor faze ale undelor seismice, pe identificarea sigură şi pe reperarea foarte precisă a momentelor de apariție a lor. O altă deosebire pe care o prezintă această categorie de descifrări de mesaje, față de cea precedentă, constă în faptul că, deşi utile — în particular cu titlul de confirmări suplimentare —, observațiile din mai multe stațiuni nu mai sînt strict necesare pentru descifrările de mesaj în vederea determinării structurii interne a Globului.

Dacă acest lucru este adevărat pentru operația propriu-zisă de descifrare de mesaj, el nu este, totuşi, valabil pentru cea care conduce la realizarea principalului instrument necesar pentru operație. Într-adevăr, mijlocul indispensabil în cercetarea interiorului Pămîntului, pentru determinarea discontinuităților majore care îi definesc structura, mijloc reprezentat de ansamblul aşa-numitelor hodocrone ale undelor seismice, se obține pe baza studiului a numeroase înregistrări ale diverselor faze de unde seismice generate de un acelaşi cutremur de pămînt, înregistrări efectuate în diverse stațiuni seismologice, la diferite distanțe epicentrale. Odată ce se dispune, însă, de acest instrument al hodocronelor, descifrarea mesajului reprezentat de seismogramă — pe care trebuie detectate, identificate şi reperate ca distribuție în timp diferitele faze ale undelor seismice — se poate face separat pentru fiecare stațiune de înregistrare.

Hodocronele, numite şi curbe drum-timp, sînt grafice în care este vizualizată legătura dintre timpii de sosire ai diferitelor faze ale undelor seismice, în diferite puncte de pe suprafața Pămîntului, şi distanțele epicentrale ale acestora. Ele se obțin trasînd curbele continue care unesc punctele reprezentative ale datelor de observație: distanțele epicentrale în abscisă şi timpii de sosire în ordonată, pentru diversele faze, bine identificate.

Realizate în cadrul unor ipoteze simplificatoare privind structura interiorului Pămîntului — în particular se postulează existența unor sfere concentrice ca suprafețe

de discontinuitate şi absenţa oricăror eterogenităţi „laterale" în mediile cu proprietăţi elastice diferite situate între acestea — dar pe baza unui material de observaţie real şi foarte bogat, privind numeroase cutremure, înregistrate în multe staţiuni, aceste grafice (cărora le corespund şi tabele numerice drum-timp, de asemenea utilizate în descifrările de mesaje avute în vedere) reprezintă rezultate cu semnificaţie de valori medii, valabile la scară planetară. Faţă de ele, determinările izolate, pentru cazuri particulare, pot să prezinte variaţii mai mult sau mai puţin importante, indicînd abateri cu caracter regional sau local de la imaginea simplificată admisă la deducerea lor.

Construcţia curbelor, respectiv întocmirea tabelelor drum-timp, nu reprezintă o operaţie uşoară. Ea este condiţionată, printre altele, de determinarea prealabilă a timpului la origine şi a coordonatelor focarului cutremurului studiat, ele însele probleme inverse cu caracter de descifrare de mesaj. Determinarea timpului la origine, adică a momentului producerii undelor seismice în focar, ca şi determinarea coordonatelor acestuia (longitudinea şi latitudinea epicentrului, adîncimea hipocentrului) implică şi ele observaţii numeroase, faţă de a căror precizie exigenţele sînt mari.

În legătură cu precizia cunoaşterii acestor parametri ai cutremurelor, se ridică şi chestiunea de principiu a plauzibilităţii concepţiei simplificatoare, privind fenomenele din focar, după care mecanismul de eliberare a energiei ar putea fi modelat printr-o sursă momentană şi punctiformă, permiţînd să se vorbească despre timpul la origine şi despre focar ca despre un moment determinat, respectiv ca despre un punct geometric. În esenţă, problema hodocronelor este o problemă de pătrate minime, aplicată datelor de observaţie, în cadrul conceptual al teoriei elasticităţii şi al teoriei propagării undelor. Problema este sensibil complicată de abaterile realităţii de la imaginile schematice din acest cadru, care cer să se facă apel la un tratament statistic îngrijit al datelor şi la lungi serii de aproximaţii succesive.

Progrese remarcabile au fost realizate în ultimii ani prin utilizarea datelor de observaţie privind undele seismice generate de explozii. Reducerea, amintită mai înainte, a numărului de parametri necunoscuţi se referă, în acest caz, tocmai la timpul la origine şi la coordonatele focarelor, ale căror valori sînt cunoscute pentru o explozie. Alături de „seismologia cutremurelor" a apărut şi s-a dezvoltat, în ultimii ani, o „seismologie a exploziilor" (avînd elemente comune cu seismologia clasică prin scara de cercetare şi cu prospecţiunile seismice prin caracterul artificial al sursei undelor elastice), care a adus contribuţii de prim ordin la îmbunătăţirea şi aplicarea instrumentului de cercetare a structurii interiorului Globului, reprezentat de curbele şi tabelele drum-timp.

Este interesant de semnalat că, pentru a se sublinia caracterul cel mai important al acestui mod de a studia structura Pămîntului, la ultimul congres internaţional de

seismologie (Lima, august 1973), numele seismologiei exploziilor a fost schimbat în acela de „seismologie cu sursă controlată”. Posibilitățile de investigație ale ei sînt, evident, altele decît ale seismologiei cutremurelor, lipsită de controlul sursei undelor în ceea ce priveşte amplasarea, momentul producerii undelor, energia eliberată şi chiar mecanismul focal. În cazul cutremurelor naturale, toate aceste elemente trebuie să fie determinate în prealabil, prin rezolvarea a tot atîtea probleme inverse, dificile descifrări de mesaje seismice.

Avînd la dispoziție, pe de-o parte, datele de observație sub forma de seismograme, pe care diversele faze ale undelor seismice au fost detectate şi identificate, şi, pe de alta, instrumentul de investigație, reprezentat de curbele sau tabelele drum-timp, descifrarea de mesaj seismic care ne interesează este posibilă, deşi nu tocmai uşoară. Ea se face în cadrul unei „geooptici” care permite urmărirea traseului unei raze seismice (normale pe unda seismică) în interiorul Globului, pe baza cunoaşterii momentului înregistrării fazei respective, în raport cu timpul la origine, şi a adoptării unei legi de variație cu adîncimea a vitezelor de propagare ale diverselor unde seismice.

Din compararea valorilor obținute prin calcul pentru timpii de propagare, în cadrul ipotezelor adoptate, cu momentele efectiv reperate pe seismograme, rezultă — într-o primă etapă — indicații privitoare la modificările necesare pentru ameliorarea acestor ipoteze şi, după realizarea acordului cu valorile observate al valorilor recalculate în urma ameliorării, chiar elemente ale imaginii structurii interiorului Globului. Cele mai importante dintre aceste elemente privesc geometria principalelor suprafețe de discontinuitate care trebuie admise şi variațiile proprietăților elastice şi ale densității în mediile pe care ele le separă.

În modul acesta s-a ajuns la stabilirea existenței, sugerată şi de alte informații geofizice — de exemplu de variații ale cîmpului gravific şi ale cîmpului geomagnetic —, a celor trei diviziuni majore ale interiorului Globului: nucleul (subdivizat în nucleu interior şi nucleu exterior), mantaua şi crusta. Contribuția remarcabilă a seismologiei, rezultată din aceste descifrări de mesaje, este nu numai la justificarea existenței diviziunilor majore (ca şi a unor subdiviziuni ale lor), cu proprietăți fizice compatibile cu cele postulate de gravimetrie (densitatea) şi de geomagnetism (conductibilitatea electrică) ci mai ales în determinarea dimensiunilor lor, prin reperarea adîncimilor la care se găsesc suprafețele de discontinuitate care le separă: discontinuitatea Mohorovičić dintre crustă şi manta, la circa 35 de kilometri, în medie, sub continente, şi la 5-6 kilometri, în medie, sub oceane — indicînd variații de grosime ale crustei terestre în acord cu datele gravimetrice şi cu concepțiile izostatice — şi discontinuitatea Gutenberg dintre manta şi nucleu, la aproximativ 2900 de kilometri (discontinuitatea Lehmann dintre nucleul exterior şi cel interior fiind la o adîncime de ordinul a 5000 de kilometri).

•

Pe lîngă cele două categorii de descifrări de mesaje seismice de primă importanță, discutate pînă acum — prin care s-a ajuns la principalele performanțe ale seismologiei, legate de cunoaşterea mecanismului focal şi, mai ales, de stabilirea structurii interne a Pămîntului —, mai există o serie întreagă de descifrări de mesaje seismice cu caracter oarecum diferit. Privind tot manifestări ale undelor elastice, generate într-un mod sau altul în interiorul planetei noastre, ele sînt efectuate în scopuri de interes mai deosebit ca, de exemplu, evaluarea energiei eliberate la producerea unui cutremur de pămînt, zonarea seismică a suprafeței terestre în anumite regiuni, obținerea de informații asupra legăturii dintre cutremurele de pămînt şi formarea munților, lămurirea raporturilor dintre seismicitate şi vulcanism etc. De asemenea, există descifrări de mesaje speciale, recent detectate, cum sînt oscilațiile libere ale Pămîntului. Nu le vom putea discuta pe toate, nici măcar în ceea ce au ele esențial, dar vom trece rapid în revistă cîteva aspecte ale problemelor legate de unele dintre ele.

Chiar după datele macroseismice, reprezentate de informații directe, obținute fără instrumente, asupra efectelor cutremurelor de pămînt, se poate ajunge la o evaluare cu aspect de caracterizare cantitativă (de fapt numai numerică) a manifestărilor lor. Adoptîndu-se, convențional, o scară de „intensități" macroseismice (scara internațională în vigoare, în prezent, are 12 grade), se poate atribui, pe baza efectelor locale ale cutremurului, în particular asupra construcțiilor dar şi asupra unor elemente naturale, un anumit grad de intensitate fiecărei localități. Reprezentarea cartografică a acestor date macroseismice duce la obținerea unei hărți cu izoseiste (linii care unesc punctele cu aceeaşi intensitate convențională), care poate servi ca atare în scopul proiectării adecvate, fără supradimensionări inutile şi costisitoare, ținîndu-se seama de seismicitatea locală, a construcțiilor antiseismice sau care poate fi folosită drept cadru pentru detalieri prin determinări instrumentale (microzonare seismică). Trebuie precizat că intensitatea macroseismică nu caracterizează un cutremur ci manifestările lui într-un anumit loc. Independent de asemenea manifestări, cutremurul poate fi apreciat, din punctul de vedere al „tăriei" lui — dar numai într-o oarecare măsură —, prin intensitatea maximă pe care o are în zona epicentrală, în aria pleistoseistă, delimitată de izoseista cu valoarea cea mai mare. Nu se poate, deci, vorbi, în mod absolut, despre intensitatea unui cutremur ci numai despre intensitatea lui într-un loc dat.

Este, de altfel, clar că un cutremur care se manifestă cu o anumită intensitate în interiorul ariei pleistoseiste va avea, în general, intensități tot mai mici la distanțe epicentrale din ce în ce mai mari. Uneori se poate întîmpla ca la distanțe intermediare intensitatea de manifestare să fie local mai ridicată datorită unor condiții geologice particulare, care determină o mobilitate mai mare a solului, cum a fost cazul zonei Bucureştilor în manifestările cutremurului din noiembrie 1940 (o insulă de intensitate

macroseismică 9, înconjurată de o mare zonă de gradul 8).

O mărime care caracterizează un cutremur, independent de manifestările lui într-un loc sau altul, este magnitudinea, definită cu ajutorul amplitudinii deplasării solului şi legată, în mod univoc, de energia degajată de cutremur. Stabilită de Richter, printr-o definiţie care conţine, totuşi, o parte de convenţional, în legătură cu determinarea instrumentală a amplitudinii, scara magnitudinilor are un caracter absolut, un cutremur fiind caracterizat, fără ambiguitate, dacă i se indică magnitudinea. (Este incorect să se vorbească de „intensitatea unui cutremur în scara Richter” cum se face în unele relatări din presă; în realitate mărimea indicată este magnitudinea.)

Există relaţii care leagă magnitudinea cu energia eliberată de cutremur şi cu intensitatea maximă a manifestării lui în zona epicentrală, aşa încît este posibil să se evalueze oricare din aceste mărimi dacă se cunoaşte magnitudinea (şi invers). Nu este lipsit de interes să menţionăm, în această ordine de idei, că o mărime definită în termeni obiectivi şi pe baze în parte instrumentale, cum este magnitudinea, poate fi estimată, cu o aproximaţie destul de bună, şi pentru unele cutremure din trecut, dacă există informaţii macroseismice potrivite. Pentru „cutremurul cel mare” din timpul lui Ştefan cel Mare, menţionat cu destule detalii în cronici şi descris, pe baza acestora, de Sadoveanu în „Izvorul Alb”, s-a evaluat intensitatea, după indicaţiile de ordin macroseismic, relatate de scriitor în următorii termeni: „În cornul dinspre răsărit al Cetăţii, turnul numit al Nebuisăi îşi lepădă în rîpă o aripă, cu mare sunet, şi clopotul lui dădu zvon prelung, atins ca de zimţii unei aripi a Demonului”. Prin intermediul valorii astfel estimate pentru intensitate, s-a putut aprecia magnitudinea şi valoarea energiei pentru un cutremur de acum o jumătate de mileniu.

În afara rolului ei de element al documentaţiei necesare inginerului constructor, harta de zonare seismică are, desigur, şi caracterul unui mesaj seismic. Din descifrarea acestui mesaj pot rezulta informaţii privind amplasarea focarului (deci nu numai locul epicentrului ci şi adîncimea hipocentrului), precum şi energia degajată, elemente utile pentru completarea caracterizării fenomenelor seismice. Descifrarea aceluiaşi mesaj poate conduce şi la informaţii de ordin geologic şi tectonic.

Noţiunea de magnitudine s-a dovedit folositoare şi în legătură cu punerea în evidenţă a unor neregularităţi privind frecvenţa de apariţie a cutremurelor. Constatarea făcută de multă vreme că marile cutremure sînt rare, pe cînd seismele slabe sînt foarte numeroase (faţă de un cutremur catastrofal de magnitudine 8 sau mai mare, pe an, numărul anual al cutremurelor de magnitudini între 3 şi 4 este de ordinul de mărime al sutelor de mii, pentru întreg Pămîntul) a fost formulată matematic într-o relaţie care exprimă cantitativ această dependenţă. Relaţia conţine constante care se determină pe baza observaţiilor, prin tratamente statistice adecvate, şi care au, chiar ele, semnificaţia unor mesaje particulare, cum are, de altfel, şi relaţia însăşi.

Să mai amintim un interesant mesaj seismic terestru, detectat în ultimul timp şi

abia în curs de descifrare: oscilațiile libere ale Pămîntului. Bănuit de multă vreme că ar putea fi provocat de cutremure puternice, fenomenul n-a putut fi pus în evidență, în mod sigur, decît cu ocazia marelui cutremur din 22 mai 1960 din Chile şi a fost recunoscut ca atare (am putea spune „omologat") la reuniunea Asociației Internaționale de Seismologie şi Fizica Interiorului Globului din cadrul adunării generale a Uniunii Internaționale de Geodezie şi Geofizică, ținută în august 1960 la Helsinki, într-o şedință considerată ca „dramatică" de către unul din marii seismologi participanți. Fenomenul constă în transpunerea în oscilație a Pămîntului ca întreg, în modul în care vibrează un clopot. Producerea oscilațiilor libere, în urma loviturii limbii clopotului, în cazul termenului de comparație folosit, este asigurată pentru cazul Pămîntului de un cutremur puternic, cum a fost şi este cazul.

Aceste oscilații libere sînt de două tipuri: torsionale, pentru care deplasările sînt perpendiculare pe rază, şi sferoidale, care implică deplasări radiale şi tangențiale. Primele sînt echivalente unor trenuri de unde Love care interferă iar cele din a doua categorie pot fi privite ca unde staționare, rezultate din trenuri de unde Rayleigh care se propagă în sensuri inverse în jurul Globului.

Detectarea atît de tardivă a acestui mesaj seismic al Pămîntului se datoreşte desigur şi rarității fenomenului, produs numai de cutremure foarte puternice, dar, în particular, faptului că pînă nu de mult nu au existat instrumente potrivite scestui scop. Înregistrarea oscilațiilor libere ale Pămîntului este posibilă numai cu aparate care reacționează la oscilații cu perioade ultralungi: față de perioadele de ordinul de mărime al secundelor — cum sînt cele ale undelor P, S şi chiar L —, oscilațiile libere ale Pămîntului au perioade de ordinul zecilor de minute, aproape o oră pentru cele sferoidale. Ele completează spectrul de frecvență al undelor seismice, extinzîndu-l pînă în domeniul care interesează înregistrările de maree terestre.

Mesajul Pămîntului reprezentat de oscilațiile libere ale lui, acum bine detectat şi identificat, a fost descifrat numai în parte. Operația trebuie efectuată admițîndu-se un anumit model al Pămîntului, caracterizat printr-o anumită distribuție a proprietăților fizice în interiorul lui. Ea fost deja realizată pentru mai multe asemenea modele, pe baza înregistrărilor oscilațiilor libere produse în special de două cutremure foarte puternice: cel amintit din Chile şi cel din Alaska, din 28 martie 1964. Principalele rezultate obținute, pînă acum, din aceste descifrări reprezintă informații suplimentare privind distribuția densității şi a vitezelor undelor P şi S (deci şi distribuția parametrilor elastici) în interiorul Globului. Cadrul teoretic elaborat pentru cercetările din acest domeniu ca şi datele de observație şi prelucrările lor au adus elemente noi şi în legătură cu undele de suprafață, contribuind la o mai bună cunoaştere şi la o înțelegere mai profundă a lor.

•

Capitolul de față se poate încheia cu constatarea că descifrările mesajelor

seismice ale Pămîntului, desigur încă imperfecte şi incomplete — şi prezentate, de altfel, într-o expunere foarte sumară şi lacunară —, au condus deja la informații dintre cele mai importante, în particular în cele două direcţii asupra cărora s-a insistat: cunoaşterea fenomenelor seismice ca natură intrinsecă şi cunoaşterea structurii interiorului planetei noastre. Completate cu diverse informații suplimentare, seismologice ca şi extraseismologice, datele astfel obținute au contribuit, în mod esențial, la elaborarea imaginii dinamice a structurii Pămîntului, ale cărei trăsături principale, abia schițate, în mod izolat, pînă acum, constituie obiectul prezentării din capitolul următor.

7. IMAGINEA DINAMICĂ A STRUCTURII PĂMÎNTULUI

„Mi s-a părut improbabil ca asemenea schimbări în zonele de suprafață ale Globului să aibă loc dacă Pămîntul ar fi solid spre centru. De aceea am imaginat că părțile interne ar putea fi un fluid mai dens şi de greutate specifică mai mare decît oricare dintre solidele pe care le cunoaştem; care în consecință ar putea înota în sau pe acel fluid. Astfel suprafața Globului ar fi o carapace susceptibilă să fie spartă şi deranjată de mişcările violente ale fluidului pe care se sprijină..."
BENJAMIN FRANKLIN

„În sînu-astei planete vueşte foc şi lavă.
...
Şi ca o piele-ntinsă, ce tremură fireşte
Cînd parazita-ascunsă o-nțeapă şi ciupeşte
Aşa planeta-acuma îşi mişcă scoarța veche."
I.L. CARAGIALE

În capitolele precedente am examinat diferite mesaje fizice ale Pămîntului, aduse de mai departe sau de mai aproape, mai mult de dedesubtul dar şi de deasupra suprafeței terestre, unde se face recepția lor, de către purtători care sînt ei înşişi diferiți: cîmpuri, particule şi unde. Numărul ca şi marea varietate a acestor mesageri, ca natură fizică, mecanism de propagare, „bătaie" (în sensul de distanță pînă la care semnalul mai este detectabil cu mijloacele actuale, respectiv nu este acoperit de zgomot), capacitate de transport de informație, accesibilitate la influențe străine — de unde, în principiu, atît avantajul îmbogățirii cu date suplimentare, privind parcursul străbătut, cît şi pericolul contaminării cu elemente parazite a informației transportate —, posibilitate de separare a semnalului util din fondul de zgomot etc. oferă o varietate corespunzătoare şi în gama mesajelor.

În asemenea situație, detectarea şi descifrarea acestor mesaje sînt condiționate de existența unui bogat arsenal de mijloace instrumentale şi conceptuale, ceea ce implică, evident, dificultăți pe plan tehnic-metrologic ca şi pe plan teoretic-interpretativ. În schimb, însă, amploarea şi varietatea conținutului informațional al rezultatelor operațiilor răsplătesc cu generozitate eforturile făcute pentru depăşirea acestor dificultăți, printre altele şi prin caracterul de complementaritate al diverselor elemente de informație obținute.

Capitolul de față este destinat prezentării trăsăturilor caracteristice ale imaginii structurii Pămîntului, rezultată din integrarea coerentă a informațiilor mai importante la care conduc descifrările actuale ale principalelor mesaje fizice terestre. Această prezentare se face în cadrul a două limitări destul de severe: (1) ponderea mare a

expunerii va reveni părții care are ca obiect situația din zonele de suprafață ale Pămîntului şi (2) se vor avea în vedere aproape exclusiv concepțiile actuale asupra fenomenelor care o determină.

Cele două limitări sînt recomandate atît de faptul că ele conturează mai de aproape domeniul care, interesînd toate geoştiințele, este cel mai bine consolidat cît şi de calitatea acestui domeniu de a oferi o amplă sinteză a datelor actuale ale tuturor disciplinelor geofizice. În acelaşi timp, concentrarea atenției asupra situației din „interiorul superficial" al planetei noastre şi polarizarea preocupărilor în jurul „filozofiei actuale" privitoare la această zonă îşi au justificarea şi în economia intrinsecă a acestei scrieri, al cărei echilibru cere, pentru încheiere, indicarea contribuției pe care o aduc descifrările actuale ale diverselor mesaje fizice terestre la formarea unei imagini coerente despre planeta noastră, în primul rînd despre părțile ei care ne sînt accesibile. Nu trebuie uitat că în contextul de față, accesibil înseamnă simultan posibilități de control, cel puțin parțial, al concepțiilor admise şi perspective de valorificare, cel puțin principială, pe plan geologic, deci interes teoretic şi practic.

Renunțînd la trecerea în revistă a evoluției ideilor cu privire la structura internă a Globului, expunerea de față se lipseşte, desigur, de avantajul perspectivei pe care o poate da o încadrare istorică a concepțiilor actuale. Apropierea de obiectul atenției, pe care o implică, însă, limitarea la imaginea lui actuală, permite, în schimb, examinarea unor detalii de semnificație deosebită. În această categorie intră, în particular, informațiile privitoare la caracterul dinamic al imaginii pe care ne-o formăm azi despre structura interiorului Globului, în ansamblu, şi a crustei lui, în particular. Este o caracteristică foarte importantă, scoasă în relief de însuşi titlul capitolului şi subliniată, de altfel, şi în cele două citate alese ca motto pentru el. În acelaşi sens, al scoaterii în evidență a caracterului dinamic, lucrează şi cealaltă limitare, reprezentată de luarea în considerare aproape exclusiv a structurii şi fenomenelor privind crusta terestră.

Aşadar, fără a ignora ceea ce se ştie, în general, despre structura internă a planetei noastre — adică şi despre părțile ei mai adînci — şi ținînd seama şi de contribuțiile din trecut care nu alterează caracterul de actualitate al concepțiilor admise în prezent, expunerea care urmează pune accentul, îndeosebi, pe imaginea dinamică a structurii crustei terestre aşa cum o vedem azi. Indicarea caracteristicilor mai importante ale distribuției spațiale a elementelor care definesc această structură şi schițarea principalelor procese determinante pentru evoluția temporală a lor aspiră la conturarea unei imagini coordonate, chiar dacă relativ schematică, reprezentînd sinteza realizărilor de pînă acum şi putînd servi, în acelaşi timp, la orientarea cercetărilor viitoare.

Dacă şi pînă acum au intervenit frecvent simplificări, adeseori chiar suprasimplificări, în prezentarea noastră, cu atît mai mult va fi vorba de aşa ceva în

expunerea pe care o abordăm acum. Fără o asemenea operație, marele număr de elemente care intervin şi bogata lor varietate, încărcarea extremă cu aspecte locale şi de prea mare detaliu, suprapunerea de procese afectînd domenii de diverse extinderi spațiale şi desfăşurîndu-se în intervale de timp de diferite ordine de mărime ar îngreuia dacă nu chiar ar împiedica separarea esențialului de accesoriu.

Grija pentru menținerea unui contact cît mai strîns cu realitatea trebuie să se manifeste, şi în această privință, mai mult în preocuparea pentru compararea principalelor elemente ale imaginii adoptate cu datele de observație corespunzătoare şi nu în încărcarea ei cu detalii de semnificație limitată. Valabilă în general, această observație se cere respectată şi în cazul de față, în ciuda dificultăților legate de caracterul de vie actualitate şi rapidă evoluție a uneia din problemele cele mai importante ale ansamblului geoştiințelor, care în termeni ontomorfici s-ar putea formula ca anatomia şi fiziologia Pămîntului, în particular a crustei sale, în termeni geonomici putînd fi desemnată ca aspectul geodinamic al structurii interne a Globului, în special pentru zonele sale de suprafață.

•

Informațiile care rezultă din descifrarea mesajelor constituite de manifestările cîmpului gravific prezintă interes pentru lămurirea structurii interne a Pămîntului atît la scară planetară cît şi pe plan regional şi local. În primul rînd, deducerea valorii medii a densității Pămîntului, pe baza cunoaşterii constantei atracției universale şi a valorii medii a gravității (şi, evident, a dimensiunilor Globului) implică prezența unui material de densități foarte mari în interiorul adînc al Pămîntului. Apoi, abaterea turtirii sferoidului terestru de la aceea a elipsoidului de rotație corespunzător duce la concluzii calitativ concordante cu această implicație şi sugerează o vîscozitate a maselor din interiorul Globului, de acelaşi ordin de mărime cu cea indicată de studiul mareelor terestre şi compatibilă cu existența unor curenți de convecție, cel puțin în concepția că valoarea actuală a turtirii nu ar corespunde condițiilor de echilibru din trecutul îndepărtat al Pămîntului ci ar avea doar o semnificație comparabilă cu aceea a anomaliilor gravimetrice continentale-regionale. Pe de altă parte, acestea indică, în cadrul concepțiilor izostatice, un echilibru special al maselor crustale, cu posibilități de adaptare la schimbări de condiții, manifestat prin absența anomaliilor izostatice şi postulînd variații în grosimea crustei terestre în sensul variațiilor de altitudine ale suprafeței fizice a Pămîntului. În fine, eterogenități în structura crustei sînt indicate de anomaliile gravimetrice regionale şi locale.

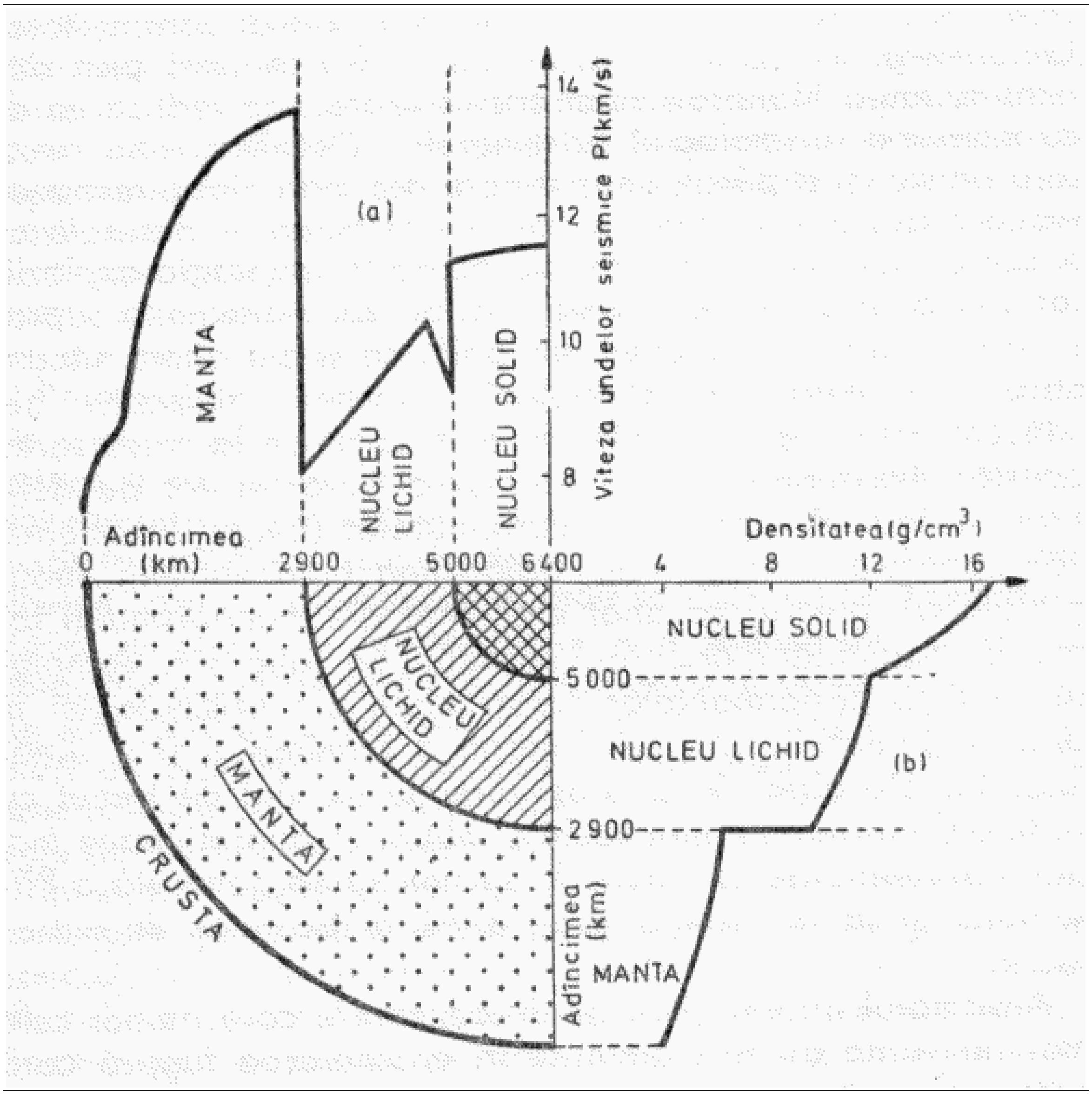
Datele privitoare la distribuția în spațiu a cîmpului geomagnetic principal sînt interesante pentru studiul interiorului Globului prin situarea sediului cauzelor care produc acest cîmp în zonele foarte adînci ale Pămîntului şi prin postularea unor conductibilități electrice ridicate, în acele zone. Informațiile la care conduce descifrarea mesajului reprezentat de variația geomagnetică seculară întăresc această deducție.

Mesajul mai complicat constituit de diversele particularități ale cîmpurilor de variații calme şi de perturbații geomagnetice este descifrat în termeni care indică o anumită variație a conductibilității electrice cu adîncimea, paralelizabilă cu alte variații de proprietăți fizice cu adîncimea, în special cu variațiile densității şi cu ale proprietăților elastice. Efectul pelicular, care se manifestă în distribuția curenților variabili induşi în Pămînt de curenții din ionosferă, anume cu densități de curent maxime la adîncimi variind invers cu frecvența lor, poate fi folosit pentru sondaje geomagnetice la scară planetară şi regională, după cum la scară regională şi locală se pot face sondaje magnetotelurice; unele şi altele sînt în stare să furnizeze informații asupra particularităților structurale ale crustei terestre. Cercetările paleomagnetice reprezintă, la rîndul lor, descifrări de mesaje care conduc la informații nu numai asupra prezentului ci şi asupra trecutului planetei noastre, informații printre care cele privitoare la inversiunile cîmpului geomagnetic în trecutul geologic joacă un rol important.

În felul acesta, cîmpurile naturale ale Pămîntului ne pun la dispoziție cîteva elemente importante privind nu numai structura statică a interiorului Globului ci şi dinamica lui. Ceea ce lipseşte acestor informații pentru a permite schițarea unei imagini cu dreptul de a aspira la indicarea de raporturi cantitative este o categorie specială de date: cele privitoare la adîncimi. Dar dacă acesta nu este punctul tare al informațiilor rezultate din descifrarea mesajelor geomagnetice şi gravimetrice, el nu lipseşte informațiilor care provin din alt domeniu: acela al seismologiei.

Principalele informații pe care le furnizează descifrările de mesaje georadioactive sînt cele privitoare la vîrsta absolută a rocilor şi la degajările de căldură care însoțesc dezintegrările radioactive. Prima categorie de informații priveşte, în particular, zonele de suprafață ale Pămîntului, deci acelea care ne interesează în mod special, pe cînd cea de-a doua se referă şi la porțiunile mai adînci ale crustei şi chiar ale mantalei terestre. Incursiunile în trecutul Pămîntului sînt posibile şi pe cale radioactivă şi merg pînă la estimări de temperatură, capabile să permită reconstituiri de paleoclimate, cu implicații privind atît biosfera cît şi procesele de modificare a suprafeței terestre.

În strînsă legătură cu datele radioactivității terestre, informațiile geotermice le întregesc prin elemente privind, în special, fluxul de căldură din interiorul spre exteriorul Pămîntului şi bilanțul geotermic. Şi unele şi altele sînt semnificative pentru scopul pe care-l avem acum în vedere, în special prin indicarea posibilității de existență a curenților de convecție din mantaua Pămîntului. Necesari pentru coerența intrinsecă a geotermiei, asemenea curenți au un rol de primă însemnătate în dinamismul imaginii actuale a structurii interne a Globului, căci ei asigură legătura dintre procesele termice din manta şi cele magnetice din crustă, legătură care constituie una din principalele trăsături ale concepțiilor tectonicii globale aproape general acceptate azi.



9. Structura interioară a Pămîntului şi variaţiile cu adîncimea a vitezei de propagare a undelor seismice longitudinale (a) şi a densităţii (b).

Este în afară de orice îndoială că cele mai importante informaţii asupra structurii interne a Pămîntului rezultă din descifrarea mesajelor seismice. Afirmaţia aceasta categorică este valabilă atît pentru interiorul adînc cît şi pentru porţiunile superficiale ale Globului terestru. Stabilitatea distribuţiei spaţiale a discontinuităţilor majore din interiorul planetei noastre care îi delimitează principalele diviziuni: nucleul (împărţit în nucleu interior şi nucleu exterior prin zona de tranziţie Lehmann), separat de manta prin discontinuitatea Gutenberg, mantaua separată de crusta terestră prin discontinuitatea Mohorovičić şi crusta reprezintă realizarea de căpetenie a seismologiei cutremurelor. Detalii privind structura crustei şi a părţilor superioare ale mantalei terestre au rezultat atît din descifrările mesajelor seismice naturale cît şi din acelea ale mesajelor provocate (seismologia exploziilor sau seismologia cu sursa controlată). Adîncimile suprafeţelor de discontinuitate principale, ca şi ale altora

secundare, variațiile „constantelor” elastice, respectiv ale vitezelor de propagare ale undelor seismice la traversarea acestor discontinuități, determinarea parametrilor de definire cantitativă a focarelor cutremurelor (timpul la origine, coordonatele epicentrului, adîncimea hipocentrului, magnitudinea), precizarea unor elemente ale mecanismului focal, în particular a orientării planului de falie etc. completează lista performanțelor remarcabile ale seismologiei în direcția lămuririi structurii interne a Pămîntului şi a dinamicii lui. De altfel, în aceeaşi direcție nu sînt de trecut cu vederea informațiile mai vechi şi obținute prin mijloace mai puțin pretențioase cu privire la seismicitatea generală a Pămîntului şi la distribuția geografică a focarelor de cutremure.

Ansamblul informațiilor geofizice, dintre care numai cele mai relevante au fost amintite în enumerarea fugară care precedă, a condus la imaginea statică a structurii interne a Pămîntului, la scară planetară, care este schițată în figura 9. Această figură indică atît diviziunile majore ale Pămîntului, cu valorile în kilometri ale adîncimilor la care se găsesc discontinuitățile care le definesc, cît şi variația cu adîncimea a vitezei undelor P, exprimată în kilometri pe secundă (curba a), respectiv a densității, exprimată în grame pe centimetri cubi (curba b). Coerența intrinsecă a acestei imagini şi încadrarea în ea a tuturor detaliilor rezultate din cele mai variate cercetări fac ca probabilitatea corespondenței ei cu realitatea să fie practic coincidentă cu certitudinea. Mai mult: statică în forma redată de figura 9, ea este compatibilă cu dinamica pe care o reclamă rezultatele unora dintre aceste cercetări.

De menționat, în această privință, sînt, în primul rînd, curenții de convecție din interiorul mantalei, postulați de necesități ale geotermiei şi ale geotectonicii, şi curenții electrici, asociați cu curenți de convecție, din nucleu, pe care îi reclamă teoriile privitoare la originea cîmpului geomagnetic principal. Aşadar, chiar la această scară planetară şi avîndu-se în vedere întregul interior al Globului terestru, dinamismul imaginii structurii lui este o caracteristică esențială a acesteia, chiar dacă dovezile în sprijinul acestui dinamism sînt doar indirecte. De altfel, unele indicații care pledează în sensul acesta sînt furnizate de anumite particularități care se manifestă în propagarea undelor seismice în interiorul adînc al Pămîntului.

•

Şi pentru imaginea dinamică a structurii zonelor apropiate de suprafața Pămîntului, reprezentate de porțiuni ale mantalei superioare şi de crusta terestră, vom menționa mai întîi fundamentarea geofizică corespunzătoare. O vom face enumerativ, fără stabiliri de priorități, cronologice sau de importanță.

Principalele fapte, bine stabilite prin observații şi măsurători, care sînt relevante pentru problema ce ne interesează, sînt legate de repartiția focarelor seismice pe Glob, de distribuția lor cu adîncimea în anumite regiuni ca şi de regularitățile, manifestate tot regional, în orientarea planelor de falie, de unele particularități ale magnetizării

rocilor, constatate fie direct fie prin efectele lor în morfologia anomaliilor magnetice, de grosimea şi vîrsta sedimentelor de pe fundul oceanelor, de caracteristici ale fluxului geotermic în anumite zone oceanice şi continentale ca şi de unele regularități ale anomaliilor gravimetrice în acele zone, toate adăugate informațiilor privitoare la relieful fundului oceanelor, rezultate din sondaje acustice foarte detaliate, între puncte controlate prin determinări directe de adîncime.

Iată acum aceste fapte, în ordinea în care ele pot contribui la elaborarea concepției actuale a tectonicii globale şi la schițarea imaginii dinamice a structurii zonelor de suprafață ale Pămîntului, imagine care stă la baza acestei concepții, desemnată acum, în mod curent, prin numele de tectonică a plăcilor.

Focarele seismice sînt situate numai în anumite regiuni şi prezintă o distribuție caracteristică cu adîncimea precum şi anumite regularități în orientarea planelor de falie în aceste regiuni. Pentru unele zone oceanice, în care studiul reliefului fundului a pus în evidență ridicări, desemnate ca dorsale oceanice şi constituind adevărați munți submarini, cu o crăpătură adîncă longitudinală în zona lor centrală, întinzîndu-se de-a lungul întregului lanț, epicentrele se aliniază pe traseul lanțului muntos submarin, cu adîncimi medii şi mici ale hipocentrelor (în general sub 30 de kilometri) şi cu orientări ale planelor de falie de regulă paralele cu direcția locală a „riftului" (cum este denumită adînca crăpătură care separă cele două creste ale lanțului muntos submarin); în ceea ce priveşte înclinările acestor plane de falie, ele sînt apropiate de planul vertical paralel cu pereții riftului în cazul cutremurelor cu focarele apropiate de suprafață şi tind spre orizontală mai în adîncime.

De-o parte şi de alta a riftului se aliniază benzi de anomalii magnetice, alternativ pozitive şi negative, avînd lățimi de ordinul zecilor şi sutelor de kilometri, bine determinate aeromagnetometric, paralele pe porțiuni cu riftul, al cărui traseu îl urmează cu fidelitate. Pe fundul oceanului, sedimentele sînt subțiri şi de vîrste recente în apropierea riftului şi tot mai groase pe măsură ce se consideră puncte mai depărtate de zona lui, cu vîrste mici spre suprafață şi tot mai mari în adîncime. Magnetismul remanent al acestor sedimente mai groase, din zonele depărtate de dorsala medio-oceanică, prezintă polarități alternativ normale (adică în sensul cîmpului geomagnetic actual) şi inverse, pentru grosimi de ordinul centimetrilor, care pot fi evaluate cu precizie satisfăcătoare. Fluxul geotermic este, în general, de valori ceva mai ridicate în apropierea dorsalei şi anomaliile cîmpului gravității au şi ele valori pozitive, mai mari în zona dorsalei, descrescînd cu depărtarea de ea.

Integrarea acestor fapte de observație, în mare parte determinate cantitativ, conduce la următoarea imagine a situației din zona dorsalelor şi din regiunile învecinate: Sub riftul din partea centrală a dorsalei are loc o ridicare a maselor fierbinți subcrustale (să le zicem magme), care au temperaturi incompatibile cu magnetizarea. Pe măsură ce ele se ridică spre suprafață, temperatura le scade şi viscozitatea le creşte,

pentru ca la o anumită temperatură ele să se solidifice şi să poată produce, prin frecare de pereții riftului, focare de cutremure. Acestea se situează la adîncimile corespunzătoare porțiunilor inferioare ale riftului, nu mai adînc decît grosimea crustei terestre în zona respectivă, planele de „falie” avînd orientarea apropiată de aceea a pereților riftului la adîncimea la care se produce evenimentul seismic. În paralel, temperatura scăzînd sub punctul Curie, se poate produce magnetizarea magmelor răcite şi consolidate, evident în direcția şi cu intensitatea corespunzătoare cîmpului geomagnetic existent acolo în acea epocă. Procesul continuînd, sub acțiunea curenților de convecție din manta, ascendenți sub dorsală şi tinzînd spre direcții orizontale sub zonele situate lateral, se produce treptat o deplasare laterală a porțiunilor consolidate, adică după direcții perpendiculare pe rift. Are, astfel, loc ceea ce s-a numit expansiunea fundului oceanului. Bineînțeles, pe crusta tînără, nou formată în zona riftului, nu există sedimente. Acestea se depun pe măsură ce crusta îmbătrîneşte şi se deplasează lateral, ajungînd, astfel, la grosimi din ce în ce mai mari la distanță de dorsală, aşa cum arată observațiile.

În acest punct al prezentării imaginii pe care o sugerează ansamblul descifrărilor de mesaje geofizice, pentru zona centrală a bazinelor oceanice, marcată de dorsale, este necesar să reamintim, în vederea completării şi explicării acestei imagini, existența inversărilor cîmpului geomagnetic, despre care a fost vorba în capitolul privitor la mesajele geomagnetice. Admițînd, la o anumită epocă, o orientare dată a cîmpului geomagnetic, să zicem cea normală, magnetizarea rocilor rezultate din răcirea magmei se face, evident, normal; tot normală va fi şi magnetizarea sedimentelor care se depun în această epocă peste tot în bazinul oceanic, căci particulele cu proprietăți magnetice care intră în alcătuirea lor se orientează, fiind încă în suspensie, sub acțiunea cîmpului geomagnetic principal, considerat a fi el însuşi „normal” (evident, în sensul de antonim al lui „invers”). Cînd se produce inversarea cîmpului geomagnetic, atît magnetizarea rocilor recent consolidate prin răcirea magmei, acum parte constitutivă a fundului eruptiv tînăr al oceanului, cît şi magnetizarea sedimentelor ce se depun peste tot, în bazinul oceanic, în această epocă, vor fi inverse. Duratele epocilor de polarități date ale cîmpului geomagnetic, determinabile prin intermediul magnetizării lavelor răcite, de vîrste cunoscute din date radioactive, sînt de ordinul de mărime al sutelor de mii şi al milioanelor de ani, timp în care expensiunea fundului oceanului duce la deplasări de ordinul zecilor şi sutelor de kilometri iar depunerea suspensiunilor din apa oceanului asigură grosimi ale sedimentelor de pe fundul lui de ordinul centimetrilor.

Dacă lucrurile se petrec aşa, lățimile benzilor de anomalii magnetice de un acelaşi semn, ca şi grosimile sedimentelor cu o aceeaşi polaritate a magnetizării, trebuie să fie proporționale cu duratele epocilor în care cîmpul geomagnetic a avut un acelaşi sens. Se constată, într-adevăr, că această condiție este satisfăcută, demonstrația fiind de ordin cantitativ. Dacă se iau în considerare durate ale epocilor de anumite sensuri ale cîmpului geomagnetic din trecut, lățimi ale benzilor de anomalii de semne

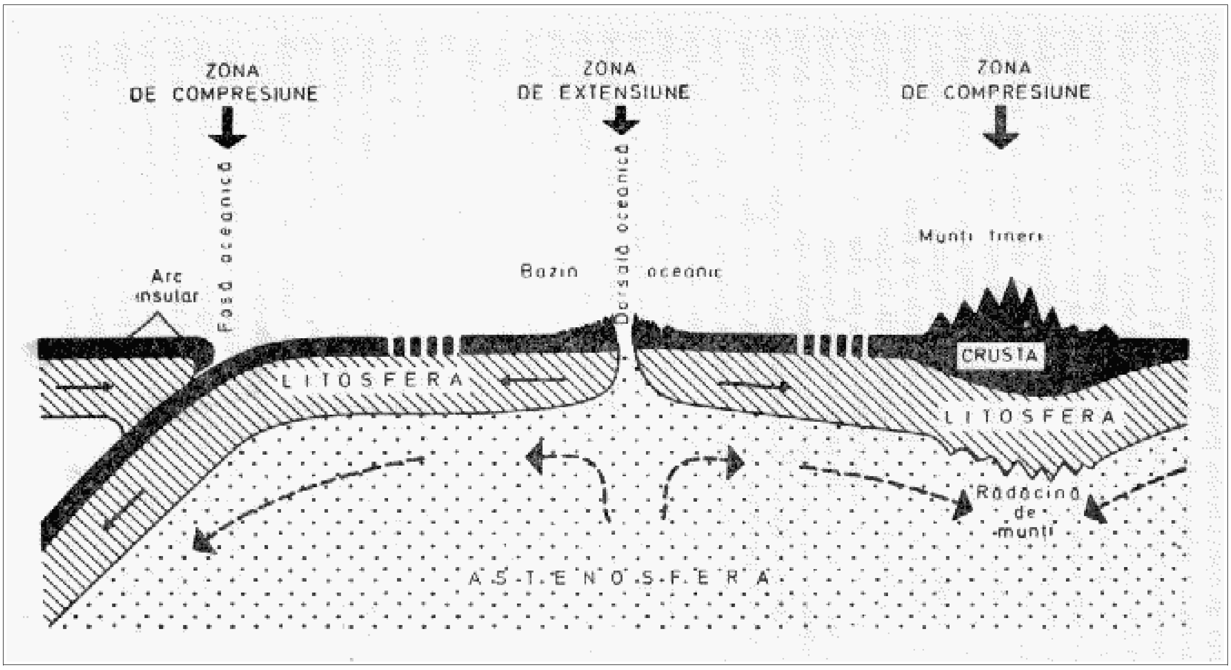
corespunzătoare şi grosimi ale sedimentelor de polarităţi de asemenea corespunzătoare şi dacă este satisfăcută condiţia ca cele trei categorii de mărimi să corespundă aceloraşi epoci, se obţine o aceeaşi valoare a raportului dintre durate, dintre lăţimi de benzi, respectiv dintre grosimi de sedimente. Se înţelege că numerele de ordine trebuie să fie corespunzător aceleaşi pentru mărimile între care se ia raportul, ceea ce se poate asigura printr-o numerotare atentă a alternanţelor, plecînd respectiv de la prezent, de la rift şi de la partea superioară a sedimentelor de pe fundul oceanului. Luînd, deci, două numere de ordine astfel determinate, raporturile dintre duratele epocilor, respectiv dintre lăţimile benzilor de anomalii magnetice sau dintre grosimile sedimentelor (determinate pe o probă scoasă din fundul oceanului) corespunzătoare acestor numere de ordine au aceeaşi valoare numerică.

Lucrul este cu atît mai remarcabil cu cît — aşa cum şi trebuie să fie, dacă concepţia corespunde realiităţii — constanţa raportului se regăseşte pentru determinări efectuate în diferite regiuni ale Globului. De asemenea, este impresionantă această verificare şi pentru că este vorba de un raport între cantităţi atît de diferite ca natură şi ca ordin de mărime: durate în timp exprimate în sute de mii şi milioane de ani, distanţe orizontale (lăţimi) exprimate în zeci şi sute de kilometri, respectiv distanţe verticale (grosimi) exprimate în centimetri.

Se înţelege că zonelor de expansiune a fundului oceanului, din porţiunile unde se găsesc dorsalele, care sînt „zone de extensiune" a crustei terestre, caracterizate prin crearea de crustă nouă din masele subcrustale ce se ridică spre suprafaţă, trebuie să le corespundă regiuni, situate la distanţă de dorsale, în care crusta mai în vîrstă, împinsă spre ele, să dispară. Asemenea zone, care sînt „zone de compresiune" a crustei şi în care aceasta este absorbită în adîncime şi consumată prin topire pentru a fi transformată în magmă, se găsesc în regiunile marilor fose oceanice din apropierea arcurilor insulare şi din faţa unor margini continentale (în jurul oceanului Pacific există astfel de fose, din ambele categorii). Caracteristicile geofizice ale unor asemenea zone, care se mai numesc, cu un termen care începe a se generaliza, şi „zone de subducţiune", sînt în special de ordin seismic: existenţa de focare de cutremure intermediare şi adînci, de adîncimi cu atît mai mari cu cît este vorba de epicentre mai depărtate de regiunea în care crusta este absorbită, şi anume în sensul în care are loc expansiunea fundului oceanului. Hipocentrele acestor cutremure se situează, conform unor observaţii făcute cu mult înainte de elaborarea concepţiilor actuale, pe plane înclinate chiar în acest sens, adică dinspre bazinul oceanic spre porţiunea de dedesubtul arcului insular, respectiv spre interiorul continentului (plane Benioff). Acestea sînt, de exemplu, cazurile prezentate de cutremurele din zona de subducţiune a insulelor Aleutine şi Japoniei, respectiv din zona Anzilor.

Pe lîngă aceste caracteristici seismice, zonele de subducţiune (sau de subîmpingere) mai prezintă două categorii de particularităţi geofizice: cu fluctuaţii relativ mari, valorile fluxului geotermic au tendinţa de a se grupa în jurul unor valori

medii regionale în general mai mici, tendință în acord cu imaginea curenților de convecție descendenți în asemenea regiuni. Pe de altă parte, anomaliile gravimetrice din aceste zone sînt în general negative, ceea ce, de asemenea, se încadrează în imaginea geodinamică a subducțiunii.



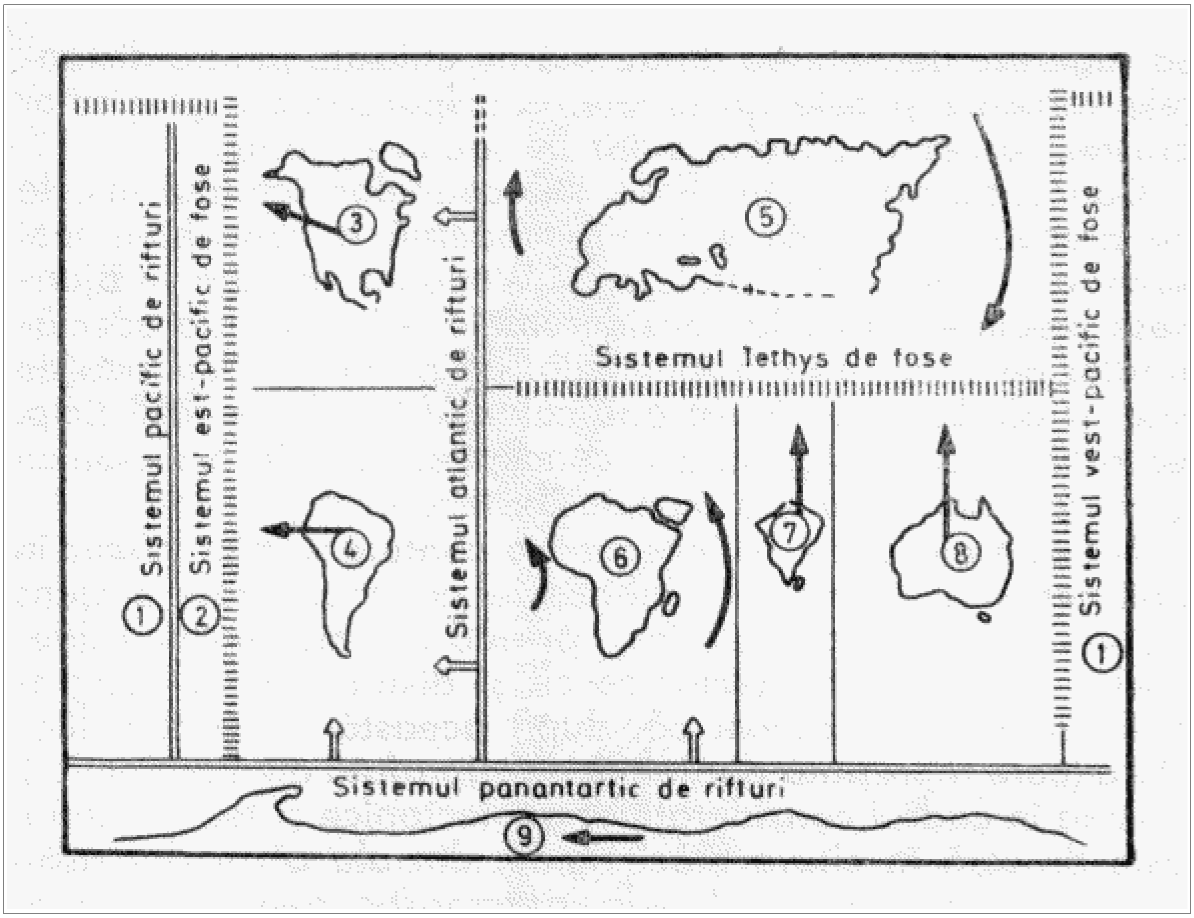
10. Dinamica mantalei superioare şi a crustei terestre.

O schiță sintetică de ansamblu a situației pe care am prezentat-o este dată în figura 10, în care se pot identifica uşor principalele trăsături ale imaginilor corespunzătoare celor două categorii importante de zone: zonele de extensiune, corespunzătoare dorsalei oceanice, sub care este indicat traseul ascendent al curenților de convecție, şi cele două tipuri de zone de compresiune, corespunzătoare subducțiunii care are loc fie în regiunile foselor oceanice din apropierea arcurilor insulare, fie în regiunile foselor din fața marginilor continentale, zone caracterizate prin prezența de munți tineri. Sub ambele categorii de zone de compresiune, curenții de convecție trebuie să prezinte tendințe ferme descendente. Schița din figura 10 este evident suprasimplificată; întreruperile din reprezentarea crustei oceanice vor să sugereze deosebirea dintre scările utilizate pentru distanțele verticale şi cele orizontale, corespunzătoare grosimilor crustei, respectiv dimensiunilor bazinului oceanic.

Concepția expansiunii fundului oceanelor, schițată în cele ce preced, reprezintă o formă modernă a concepției mai vechi a derivei continentale a lui Wegener, la care se ajunsese plecîndu-se de la considerentele calitative ale asemănărilor de contururi ale Americilor, în particular America de sud, şi ale Lumii vechi, în particular Africa. În acelaşi timp, ea este etapa preliminară a concepției actuale a tectonicii globale, cunoscută sub numele de tectonica plăcilor.

Nu este aici locul să încercăm o conturare, nici măcar în linii generale, a ansamblului acestei concepții, care a ajuns la un mare grad de detaliere, privind atît mecanismul diferitelor particularități tectonice cît şi distribuția lor geografică. Vom indica numai că, după această concepție, litosfera (care reprezintă porțiunile de suprafață ale Pămîntului), numită în cadrul considerațiilor geotectonice şi tectonosferă, este divizată în cîteva plăci rigide, din ale căror deplasări relative ar rezulta principalele caracteristici geofizice şi geotectonice ale porțiunilor din interiorul Pămîntului din apropierea suprafeței lui. Deplasările plăcilor litosferei au loc pe masele subcrustale plastice, care nu le opun rezistență şi pentru a căror denumire a fost adoptat termenul de astenosferă, creat anterior de seismologi, pe baza altor considerente, în legătură cu descreşterea vitezelor de propagare a undelor seismice în aceste zone.

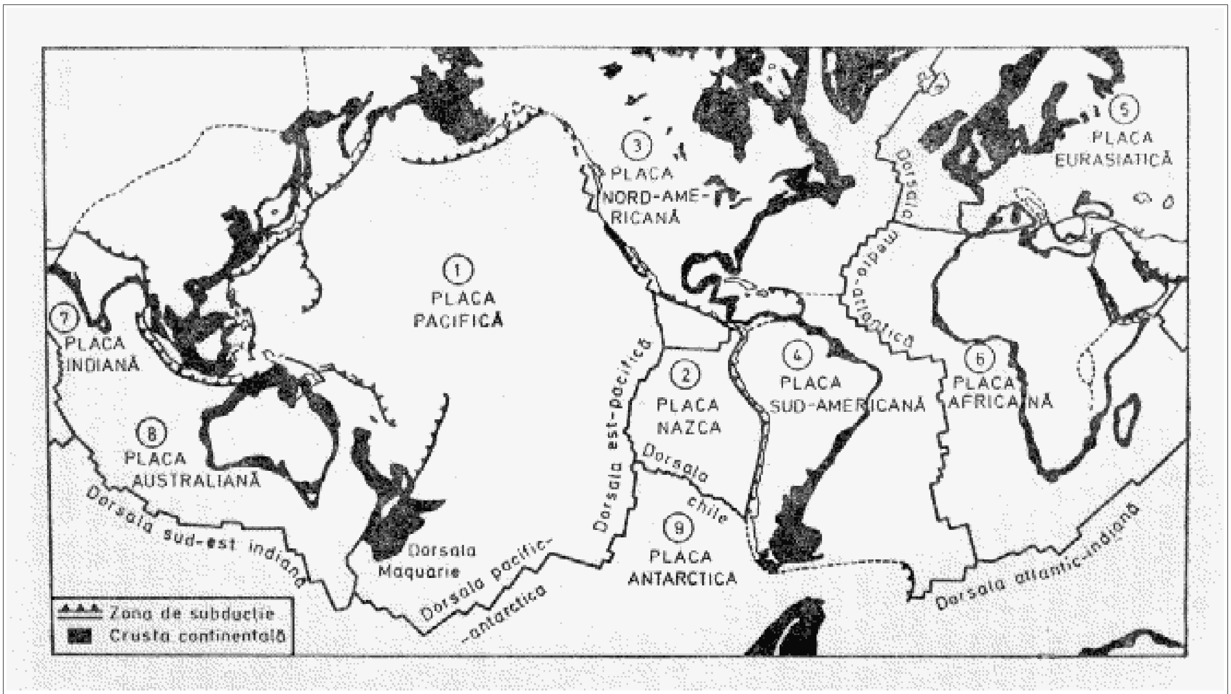
Folosind, la început, şase plăci (versiunea Le Pichon), această concepție a tectonicii globale le-a înmulțit în curînd la nouă (versiunea Dietz-Holden), pentru a ajunge, la ora actuală, la un mare număr de plăci şi plăcuțe (ceea ce, de altfel, ia concepției caracterul de autentică „tectonică globală”).



11. Schema sistemului mondial de plăci crustale majore.

În figura 11 este reprodusă schema sistemului mondial de plăci litosferice

majore, după Dietz şi Holden (1970). Din cele şase plăci inițiale ale lui Le Pichon au rămas intacte numai trei: placa euroasiatică (5), placa africană (6) şi placa antarctică (9). Celelalte trei s-au divizat fiecare în cîte două plăci, conducînd la placa pacifică (1) şi placa „Nazca” (2), rezultate din vechea placă pacifică unică, apoi placa nordamericană (3) şi placa sudamericană (4), provenind din placa americană, unică la început, şi, în fine, placa indiană (7) şi placa australiană (8), reprezentînd rezultatele împărțirii plăcii respective indiano-australiană, considerată inițial unitară. Limitele reprezentate de sistemul mondial de dorsale şi fose oceanice se pot recunoaşte în figura 11, foarte schematică, dar mai bine, cu traseul lor real, în figura 12, adoptată cu adaptări simplificatoare din programul american pentru Proiectul de geodinamică (1973). În figura 12 numerotarea este, bineînțeles, aceeaşi ca în figura 11, corespunzînd şi indicațiilor de mai sus.



12. Principalele elemente ale mozaicului planetar al tectonicii plăcilor.

Trebuie să adăugăm că, pe lîngă zonele de divergență a plăcilor, care sînt zonele de extensiune corespunzătoare dorsalelor, şi pe lîngă zonele de convergență a lor, care sînt zone de compresiune cu subducțiune, corespunzătoare foselor oceanice din cele două categorii amintite, există şi zone de convergență de tipul caracterizat, de exemplu, de contactul dintre placa indiană şi uriaşa placă euroasiatică, contact marcat de lanțul muntos himalaian. Mai există, de asemenea, zone de deplasări laterale ale plăcilor, de tipul reprezentat de contactul dintre placa pacifică şi cea nordamericană, contact marcat de falia transcurentă San Andreas, fiecare cu caracteristici geofizice şi tectonice specifice.

•

Desigur, imaginea dinamică a structurii Pămîntului, pe care am prezentat-o schematic mai sus, în lumina concepției actuale a tectonicii plăcilor, are principalele calități ale unei teorii ştiințifice: sintetizează şi explică fapte cunoscute şi prevede situații care sînt de aşteptat în zone caracterizate prin anumite condiții. Fundamentată pe numeroase date de observație, bine stabilite, multe din ele cantitative, ea a luat forme organizate noi. Ideile, care stau de asemenea la baza ei, au, însă, un trecut. Despre deriva continentală, despre expansiunea fundului oceanelor şi chiar despre deplasările relative ale unor plăci în care ar fi divizată crusta terestră s-a mai vorbit, şi uneori şi de către nespecialişti.

Se poate cita ca o idee premergătoare a acestei concepții, de fapt ca o expresie rudimentară a concepției derivei continentale, mențiunea făcută de Samuel Pepys în jurnalul său, la 23 mai 1661: „Jones Moore matematicianul ne-a făcut să credem de-a binelea, cu argumente întemeiate, că Anglia şi Franța au făcut parte cîndva din acelaşi continent”. Nu sînt, apoi, cuvintele dintr-o scrisoare a lui Benjamin Franklin din 22 septembrie 1782, citate la începutul acestui capitol, o expresie limpede a principalei idei a tectonicii plăcilor? Ce să mai spunem de intuiția extraordinară a lui Blasco Ibañez, care, în „Călătoria unui romancier în jurul lumii”, face următoarea observație pertinentă: „Crusta terestră nu este nici uniformă nici rigidă ci este fragmentară şi pluteşte, ca un mozaic de zgură răcită, pe Globul compact de materie incandescentă care constituie partea interioară a planetei noastre”? Poate şi mai surprinzător trebuie să ni se pară acelaşi romancier cînd îl auzim vorbind despre „... măreața singurătate a oceanelor, paznici ai forțelor care întineresc planeta noastră”.

Am fi aproape tentați să spunem, împreună cu înțeleptul Solomon, că nu este nimic nou sub Soare. Totuşi, concepția tectonicii plăcilor conține foarte importante elemente noi, aşezate toate la fundamentarea ei ştiințifică: datele geofizice rezultate din descifrarea mesajelor fizice ale Pămîntului. Lucrul acesta este, în general, uitat, chiar de către cei mai fervenți adepți ai ei, adeseori nu prea introduşi în aspectele cantitative ale concepției şi nu totdeauna cunoscători ai solidului substrat geofizic al ei.

De altfel, chiar cunoscîndu-se acest substrat se poate încă discuta în legătură cu unele aspecte puțin satisfăcătoare, în prezent, ale noii concepții a tectonicii globale. Această remarcă este valabilă, în particular, dacă ne gîndim la două puncte nevralgice ale ei: explicarea particularităților tectonice din interiorul plăcilor, în general dificultăți ale tectonicii continentale, mult mai mari decît cele ale tectonicii oceanice, şi identificarea sursei de energie care alimentează întregul mecanism al plăcilor.

Cu atît mai mult sînt posibile discuțiile dacă se ignorează fundamentarea geofizică a concepției. În această privință s-ar putea cita numeroase asemenea discuții, în parte interesante prin argumentele aduse pro şi contra, ca şi prin semnalarea de noi şi noi particularități geofizice şi tectonice , care se încadrează sau nu se încadrează în

vederile concepției.

Ne vom limita să menționăm doar cîteva opinii exprimate de un adversar hotărît al tectonicii plăcilor, în opoziție cu opiniile unor susținători nu mai puțin hotărîți ai ei, la ultimele două mari congrese internaționale de specialitate, nu tocmai în completă necunoaştere a aspectelor geofizice ale problemelor dar în parte (şi dintr-o parte) cu o aparentă ignorare a lor. La adunarea generală a Uniunii Internaționale de Geodezie şi Geofizică (Moscova, august 1971), V.V. Beloussov prezenta „tezele" următoare: „Încercarea de a geometriza structura fundului oceanului şi de a o împărți într-un mic număr de plăci rotindu-se în jurul anumitor centre este un exemplu de schemă dusă extrem de departe. Deşi nu o putem afirma categoric pînă nu se va fi realizat forajul prin al doilea strat al fundului oceanului, s-ar putea ca fundul oceanului modern să fie relativ tînăr. Dacă este adevărat, atunci întinerirea nu este rezultatul dispariției lui sub continente ci este datorită poate circulației verticale a materialului mantalei şi crustei, care a afectat întregul fund al oceanului." La aceeaşi reuniune ştiințifică internațională, S.K. Runcorn, după ce examinează posibilitatea deplasării plăcilor pe astenosfera aproape staționară, se declară categoric, aducînd argumente cantitative, pentru altă cauză a mişcării lor: „... este mai posibil ca convecția în manta să fie cauza mişcării plăcilor".

La Congresul Geologic Internațional (Montreal, august 1972), față de părerea lui Beloussov că „Toate datele de care dispunem arată că regiunile endogene de la suprafață îşi au rădăcinile adînc în manta; aceasta pledează în contra oricărei idei de deplasare orizontală importantă în tectonosferă şi astenosferă", se ridică opinia exprimată, în termeni oarecum particulari dar categorici, de către Holden şi Dietz: „Pacificul este în întregime un bazin de fose oceanice, înconjurat de zone de subducțiune".

Ce poate să creadă nespecialistul despre situația schițată numai prin cîteva momente dintr-o dispută de durată, în jurul unei concepții care a fost considerată ca semnalul unei adevărate revoluții în domeniul ştiințelor Pămîntului? În primul moment el rămîne, probabil, nedumerit. Nu este, însă, exclus ca după oarecare ezitare să ia o atitudine. Una extremă, de adoptare fără rezerve a noii concepții, cu repudierea completă a tot ce s-a făcut în domeniul respectiv înainte. E cazul unui popularizator al ştiinței care şi-a intitulat un articol de prezentare a tectonicii plăcilor cu următorul manifest revoluționar: „Aruncați cărțile de geologie. Suprafața „stabilei" noastre planete este în continuă mişcare, continentele înseşi învîrtindu-se, înclinîndu-se, deplasîndu-se în derivă şi scufundîndu-se sub picioarele noastre". Sub acest titlu, el însuşi o profesiune de credință, autorul afirmă că teoria tectonicii plăcilor este „noua biblie a geoştiințelor". La cealaltă extremă se situează, evident, repudiatorii fără ezitare. Şi între extreme, cei care mai rămîn nehotărîți, neîncrezătorii şi prudenții. Părerea lor este, cel mult, cea exprimată, în alt context, de Ion Pillat:

„Cred mulți... dar cine știe de-i faptă sau poveste!”

Geofizicianul este îndreptățit să creadă, pe baza cunoașterii fundamentării pe datele geofizice a concepției, că ea corespunde realității în liniile ei mari, esențiale, dar că are încă nevoie de perfecționări și completări, care să-i permită o și mai bună adaptare la realitate, o și mai cuprinzătoare putere de sintetizare, o și mai pătrunzătoare forță de prevedere. Sînt încă multe de așteptat de la integrarea datelor de observație ca și de la finisarea cadrului conceptual.

Pe de altă parte, sînt și multe de temut, nu atît din partea adversarilor cît din partea adepților prea ușor cîștigați, dintre cei care au intuiția productivității ideii dar nu și înțelegerea profundă a fundamentării ei. Este de temut, în particular, zelul neofiților, mai ales al celor care sînt dispuși să creadă fără a cerceta.

ÎNCHEIERE

„Există două ținte ale cercetării; una vrea să descopere amănunte noi, să îmbogățească conținutul experienței; cealaltă, să-l sistematizeze, să-l unifice. Nu te opri din drum, depune efortul cel mai ostenitor, mergi pînă la capăt, atinge limita, restabileşte unitatea."

TUDOR VIANU

În fruntea introducerii acestei scrieri pusesem cîteva versuri dintr-un poem al lui Whitman, în care, după recunoaşterea dificultăților din calea celor ce se apropie de tainele Pămîntului, poetul le adresa un îndemn: „nu vă descurajați, mergeți înainte", asigurîndu-i că în față se găsesc lucruri minunate. Iată că acum, pregătindu-ne să încheiem trecerea în revistă a principalelor mesaje ale Pămîtului în descifrări actuale, apelăm — pentru a scoate în relief semnificația mai largă a acestor operații, în cadrul unei autentice cercetări — la un citat tot din domeniul extraştiințific, purtător şi el al unui îndemn, adresat cercetătorului: „nu te opri din drum,... mergi pînă la capăt,... restabileşte unitatea."

Considerînd dinafară — aşa cum am făcut noi — eforturile cercetătorilor din domeniul ştiinței fizice a Pămîntului de a strînge materialul faptic, pe de o parte, şi de a-l organiza într-o sinteză coordonată, pe de alta, este bine să avem în vedere rolul funcțional şi semnificația gnoseologică a acestor două etape principale ale cercetării. Căci este, evident, vorba de două etape deosebite, deşi nu totdeauna net distincte, care se succed în timp. Cele două ținte ale cercetării, despre care vorbeşte Tudor Vianu, polarizează activități consecutive, chiar dacă, parțial, acumularea materialului de observație este însoțită şi de o ordonare conceptuală sau dacă sistematizarea interpretativă cere şi primeşte completări de date reale.

În comportarea geofizicienilor față de mesajele Pămîntului — atît de diferite prin natura lor fizică, prin amplasarea spațială a surselor lor, prin mecanismul de transmitere ca şi prin condițiile de detectare şi de descifrare — prima etapă este totdeauna prezentă, fiind reprezentată de recepționarea, detectarea şi identificarea semnalelor care constituie mesajul respectiv. Cea de-a doua etapă apare, însă, adeseori numai parțial şi uneori — în cazurile relativ frecvente azi ale specializării excesive a cercetătorilor — fără reliefarea necesară pentru recunoaşterea semnificației pe care o are de contribuție la realizarea unei unități depăşind specialitatea. Înfățişarea ei curentă este aceea de descifrare de mesaj, limitată de regulă la transpunerea, în termenii disciplinei respective, a informațiilor pe care acesta le conține, fără preocuparea integrării lor în ansamblul căruia aparțin.

Or, tocmai această fază finală, de restabilire a unității, este esențială. Necesitatea

ei, pentru valorificarea deplină, pe planul cunoaşterii şi înțelegerii, a datelor furnizate de observație, este subliniată, în cazul mesajelor complexe ale Pămîntului, de faptul că prima fază implică aproape totdeauna o examinare unilaterală, sub o fațetă particulară, a unui proces la a cărui desfăşurare contribuie mai mulți factori. După expresia lui Lucian Blaga, de cele mai multe ori are loc o adevărată „complicitate universală la producerea unui fenomen". Cercetarea rămîne, bineînțeles, incompletă dacă analiza acestei complicități, care în mod fatal duce la fragmentarea unității naturale, nu este urmată de sinteza care să tindă la refacerea unității.

În drumul parcurs în această scriere, s-a încercat să se furnizeze informații care, respectînd în linii mari evoluția procesului de cercetare însuşi, să nu-i accentueze defectele legate de desfăşurarea lui într-un cadru de supraspecializare. De aceea, examinarea succesivă a principalelor mesaje fizice ale Pămîntului, în încadrarea particulară corespunzătoare naturii lor fizice şi tehnicilor de detectare şi descifrare, a fost precedată de o prezentare de ansamblu a categoriilor de mesaje terestre: cîmpuri, particule, unde, şi urmată de o schiță sintetică a imaginii alcătuirii şi dinamicii planetei noastre, aşa cum rezultă din informațiile aduse de mesajele respective. În felul acesta, s-a căutat să se subordoneze examinarea separată a diferitelor mesaje ale Pămîntului scopului final, reprezentat de obținerea unei imagini coerente şi vii, intrinsec compatibilă ca structură şi funcțional coordonată ca dinamică, a planetei noastre.

Prin forța lucrurilor, în cadrul fiecărui capitol prezentarea a fost selectivă şi, deci, inevitabil fragmentară. Ea a fost, totuşi, împinsă, în toate cazurile, pînă la stadiul descifrării actuale a mesajelor terestre luate în considerare, în termenii calitativi şi, pe cît posibil, eliberați de esoterismul specialității, ai unei informări care să garanteze accesibilitatea, fără o simplificare exagerată, comportînd riscul unei distorsionări. Cu atenție pentru faptele de interes mai general, fără a ignora, însă, în unele cazuri, nici detaliul semnificativ, trecerea în revistă pe care o încheiem a avut permanent în vedere cea de-a doua țintă a cercetării, de care vorbeşte Tudor Vianu: restabilirea unității.

Pămîntul este, fără îndoială, o unitate, o unitate structurală şi o unitate funcțională. Manifestările variate ale acestei unități şi caracteristicile procesului de cunoaştere ca şi ale tehnicilor care îi asigură desfăşurarea duc la abordarea fragmentară a ei şi, în consecință, la obținerea de elemente disparate de informație. Integrarea acestora în totul la care se referă este absolut obligatorie pentru garantarea atingerii scopului final: cunoaşterea şi înțelegerea autentică a planetei noastre.

Desigur, aşa cum spunea Henri Poincaré, o ştiință se construieşte din fapte, aşa cum o casă se construieşte din pietre; dar o simplă acumulare de fapte nu constituie o ştiință, după cum o grămadă de pietre nu formează o casă. Fără a exploata prea mult această comparație, vom sublinia că, în expunerea noastră, am urmărit ca, chiar în decursul prezentării acumulării de fapte, să realizăm nu numai oarecare ordine ci să pregătim şi sinteza întregitoare ulterioară. Ultimul capitol a încercat, în fine, însăşi

sintetizarea corespunzătoare scopului urmărit.

Ceea ce s-a avut sistematic în vedere, în tot cursul prezentării noastre, a fost scoaterea în evidență a semnificației generale pe care o are operația de descifrare a mesajelor fizice ale Pămîntului, chiar în cazul unei specificități intrinsec ridicate a lor. În cartea sa „Evoluția creatoare”, Bergson are o remarcă a cărei însemnătate nu poate fi subliniată îndeajuns, din punctul de vedere al acestei semnificații: „Ca ființe vii — spune filozoful — noi depindem de planeta pe care ne găsim şi de Soarele care o alimentează, de nimic altceva. Ca ființe care gîndesc, putem aplica legile fizicii noastre acestei lumi care este a noastră...” Considerăm că una din principalele caracteristici ale acestei scrieri este aceea de a fi arătat, la nivelul adoptat pentru prezentare, felul în care legile fizicii se aplică în descifrarea mesajelor Pămîntului.

Una din dificultățile pe care numai cei obişnuiți cu prezentarea matematică a legilor naturii o pot recunoaşte a fost legată, la întocmirea acestei cărți, de încercarea de a prezenta în termeni calitativi, fără formule şi ecuații, diferite concepții, fapte şi interpretări care au fost formulate, prinse, respectiv elaborate în termeni cantitativi, cu ajutorul unui simbolism matematic în acelaşi timp elocvent, elegant şi expeditiv. Nu este exclus ca acest mod de a prezenta în cuvinte chiar şi ceea ce se pretează mai bine unei prezentări în expresii matematice să fi lăsat incomplet lămurite unele aspecte ale chestiunilor abordate, în particular să fi atribuit, în mod artificial, caracterul de postulate conceptuale unor rezultate ale observațiilor. Conştient de acest risc, autorul a încercat să-l evite, pe cît posibil.

O dată făcute aceste observații generale în legătură cu felul în care autorul a încercat să-şi îndeplinească obligațiile de ghid în excursia la care a invitat pe cititor, nu este lipsită de interes semnalarea unei prelungiri posibile a impresiilor pe care le-ar putea lăsa această excursie. Informațiile culese de-a lungul drumului parcurs şi impresiile corespunzătoare nu sînt lipsite, în principiu, de posibilitatea de a da şi satisfacții extragnoseologice. În afara mulțumirii de a cunoaşte şi înțelege mediul fizic ambiant şi cadrul lui mai general, de a fundamenta ştiințific o concepție clară despre lume, nu pot afecta asemenea informații şi impresii, şi mai profund, starea de spirit a celuia căruia i-au fost transmise?

Este foarte probabil că de o „afectare” se poate vorbi în multe cazuri. Dar în ce sens? Opiniile celor ce s-au gîndit la astfel de efecte ale cunoaşterii lumii sînt extrem de variate, situîndu-se între două extreme, pe care le vom aminti.

La un capăt se găsesc părerile acelora care cred că a cunoaşte lumea la scări cu totul diferite de cea omenească ajută la menținerea echilibrului sufletesc, ar avea chiar efecte reconfortante. Iată, de exemplu, cuvintele lui Vasile Pârvan, pe care le cităm în acest context, deşi ele se referă la o scară depăşind pe cea planetară, la care am considerat noi, de cele mai multe ori, mesajele Pămîntului: „Continua comparație a soartei omeneşti cu nesfîrşitul Cosmosului e cel mai bun ajutor împotriva prea marei

bucurii ori prea marei întristări de lucrurile pămînteşti". În schimb, Anatole France îl situează pe prietenul său Jean, din „Grădina lui Epicur", la polul opus, cu opinia următoare: „... ştiinţa este aceea care întristează pe oameni, care îi pune în legătură cu obiecte faţă de care ei sînt disproporţionaţi şi schimbă adevăratele condiţii ale raportului dintre ei şi natură... ea creează micimea noastră măsurînd astrele, scurtimea vieţii măsurînd vîrsta Pămîntului..."

O aprofundare a substratului psihologic al acestor atitudini extreme şi a implicaţiilor lor pe plan general cultural — în special pentru filozofie şi literatură — ar fi, desigur, interesantă dar nu-şi are locul în limitele şi la nivelul preocupărilor nostre aici. Ceea ce putem, totuşi, adăuga — cu riscul unei uşoare bagatelizări — este că ştiinţele Pămîntului şi în particular geofizica provoacă, în majoritatea cazurilor, efecte medii, între cele două extreme (spre care se pare că ar împinge astronomia). Asigurînd omului cunoaşterea şi înţelegerea propriei planete, ca organism complex în continuă devenire, geofizica îi dă, chiar prin aceasta, mulţumirea familiarizării, pe plan intelectual, cu amplul cadru în care el îşi desfăşoară viaţa şi activitatea. Fără a merge pînă la potolirea unor eventuale nelinişti cosmice, geofizica poate da, totuşi, omului care gîndeşte satisfacţia de a constata cît de mult îşi poate extinde, în spaţiu şi chiar în timp, capacitatea de comprehensiune, care fără mijloacele ştiinţei — create tot de el — s-ar limita la imediatul reprezentat de un „aici" foarte local şi de un „acum" foarte actual.

După ce a arătat ce a urmărit în scrierea la al cărei termen final a ajuns, autorul ţine să sublinieze, în mod special, şi ceea ce nu a urmărit: cartea de faţă nu este nicidecum o introducere în geofizică. Ea nu are nici caracterul sistematic, nici ponderea adecvată a diverselor părţi, nici stilul de prezentare care să asigure formarea acelei imagini simplificate şi echilibrate în stare să constituie suportul unei detalieri ulterioare, cum trebuie să fie o bună introducere într-o ştiinţă. Ceea ce mai lipseşte, apoi, scrierii de faţă pentru a fi o introducere în geofizică este, evident, şi limbajul fizico-matematic caracteristic şi esenţial pentru această ştiinţă a Pămîntului. Dacă autorul a ţinut să menţioneze în termeni expliciţi că, scriind aceste pagini de informare generală asupra problemelor geofizice legate de mesajele Pămîntului şi descifrarea lor, nu s-a gîndit deloc la o introducere în geofizică, este pentru a nu i se atribui cumva o asemenea intenţie şi a se face, apoi, constatarea că realizarea nu corespunde intenţiei.

În legătură cu această ultimă precizare, autorul îşi aminteşte de întîmplarea relatată de un coleg al său din străinătate, care a scris o carte cu destinaţia, declarată chiar în titlu, de introducere în geofizică. Într-o discuţie cu editorul, despre categoriile de cititori potenţiali ai unei astfel de cărţi, acesta i-a atras atenţia asupra posibilităţii ca ea să cadă şi în mîna unor persoane care nu intenţionează să devină geofizicieni. Pentru un cititor din această categorie, cartea ar trebui — spunea editorul — să răspundă indirect la cel puţin două întrebări: (1) Ce este specific geofizicii? şi (2) Ce înseamnă geofizica pentru negeofizician?

Destinația cărții de față fiind aceea de a fi citită în special de persoane din categoria pentru care editorul amintit socotea necesară asigurarea răspunsurilor la cele două întrebări de mai sus, autorul ei — care la sfîrşitul prefeței invitase pe cititor să participe la o tentativă de familiarizare cu „natura Pămîntului" — îşi permite, acum la capătul drumului străbătut împreună, în acest scop, să-i adreseze o nouă şi ultimă invitație: să încerce să răspundă la aceste întrebări.

Cititorul o poate face, luînd, în fine, cuvîntul, după ce a fost ținut atîta timp de vorbă.

CUPRINS

editura științifică

Destinată unui public larg, cartea prezintă principalele contribuții ale geofizicii la cunoașterea și înțelegerea planetei noastre. Ea pleacă de la constatarea că, metodele geofizice nu se aplică direct obiectului propriu-zis al cercetării ci unor efecte ale lui, reprezentînd autentice mesaje, trimise de Pămînt sau de părți ale lui prin trei categorii de agenți fizici: cîmpuri, unde, particule.

Considerînd, astfel, cercetările geofizice ca descifrări de mesaje terestre, cartea trece în revistă pe cele mai importante dintre ele. Principalele rezultate ale acestor descifrări sînt utilizate pentru a se contura „imaginea dinamică a structurii Pămîntului", sub dublul ei aspect de sinteză a informațiilor geofizice și de cadru actual de integrare a datelor celorlalte geoștiințe.



Liviu Constantinescu este profesor de geofizică la Universitatea din București și membru corespondent al Academiei.

În cercetare a adus contribuții în domeniul cîmpurilor naturale ale Pămîntului și în seismologie. A publicat în țară și în străinătate peste 50 de lucrări și este coautor și coordonator al unui tratat de specialitate.

A organizat și condus Observatorul geofizic Surlari, secțiile de geofizică din institutele Academiei și, ca director adjunct științific, Centrul de cercetări geofizice.

Pe plan internațional, profesorul Liviu Constantinescu a prezentat peste 20 de comunicări și a ținut peste 30 de conferințe. Membru titular și, într-un caz, „honoris causa" al mai multor organizații străine și internaționale de specialitate, a fost vicepreședintele Uniunii Internaționale de Geodezie și Geofizică și este vicepreședinte al Comisiei Europene de Seismologie.